

(19) 日本国特許庁 (JP)

## (12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号

特表2005-502265

(P2005-502265A)

(43) 公表日 平成17年1月20日 (2005.1.20)

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>

H04B 10/02

H04B 10/18

F I

H04B 9/00

M

テーマコード (参考)

5K102

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 73 頁)

(21) 出願番号 特願2003-526031 (P2003-526031)  
 (86) (22) 出願日 平成13年8月31日 (2001.8.31)  
 (85) 翻訳文提出日 平成16年1月14日 (2004.1.14)  
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2001/007567  
 (87) 国際公開番号 W02003/021821  
 (87) 国際公開日 平成15年3月13日 (2003.3.13)  
 (81) 指定国 EP (DE, FR, GB), CN, JP, US

(71) 出願人 000005223  
 富士通株式会社  
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
 1号  
 (74) 代理人 100074099  
 弁理士 大菅 義之  
 (74) 代理人 100067987  
 弁理士 久木元 彰  
 (72) 発明者 ラスムッセン, イエンス シー.  
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
 1号 富士通株式会社内  
 (72) 発明者 石川 丈二  
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
 1号 富士通株式会社内

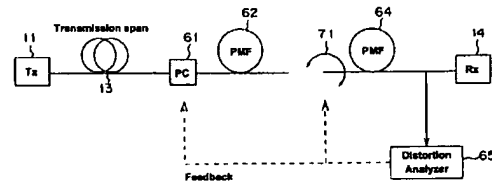
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 適応制御可能な偏波モード分散補償器

## (57) 【要約】

偏波変換器とそれに続く2本のPMFは、PMD補償器の主偏波状態 (PSP) を光伝送線路のPSPに合わせ、それらのPMFの間のモード結合調整器は、PMFの群遅延時間差およびPSP回転率を調整する。

【選択図】 図18



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

光伝送線路のための偏波モード分散補償器であって、  
前記光伝送線路および偏波モード分散補償器の連鎖の主偏波状態を、該光伝送線路に入力  
される光信号の入力偏波状態に揃える主偏波状態調整器と、  
前記偏波モード分散補償器内のモード結合を調整するモード結合調整器と  
を備えることを特徴とする偏波モード分散補償器。

## 【請求項 2】

光伝送線路のための偏波モード分散補償器であって、  
前記光伝送線路および偏波モード分散補償器の連鎖の主偏波状態を、該光伝送線路に入力 10  
される光信号の入力偏波状態に揃える主偏波状態調整器と、  
前記主偏波状態調整器に続く第 1 の複屈折素子と、  
前記第 1 の複屈折素子に続き、偏波モード分散補償器内のモード結合を調整するモード結  
合調整器と、  
前記モード結合調整器に続く第 2 の複屈折素子と  
を備えることを特徴とする偏波モード分散補償器。

## 【請求項 3】

前記主偏波状態調整器は、波長領域内の複数のスペクトル成分について、前記伝送線路お  
よび補償器の連鎖の主偏波状態を前記光信号の入力偏波状態に揃えることを特徴とする請  
求項 2 記載の偏波モード分散補償器。 20

## 【請求項 4】

前記モード結合調整器は、前記第 1 および第 2 の複屈折素子の群遅延時間差と該第 1 およ  
び第 2 の複屈折素子の主偏波状態の回転率を調整することを特徴とする請求項 2 記載の偏  
波モード分散補償器。

## 【請求項 5】

前記モード結合調整器は、機械的回転器、回転可能位相板、および可変複屈折波長板のう  
ちの 1 つに対応することを特徴とする請求項 2 記載の偏波モード分散補償器。

## 【請求項 6】

前記モード結合調整器は、前記第 1 および第 2 の複屈折素子の固有軸の間の固定角度に対  
応し、該角度および該第 1 および第 2 の複屈折素子の群遅延時間差値は、前記光伝送線路 30  
の主偏波状態の回転率が環境変動によりゼロになる場合に、前記補償器の実際の主偏波状  
態の回転率が許容可能な量の信号歪みのみをもたらすように選択されることを特徴とする  
請求項 2 記載の偏波モード分散補償器。

## 【請求項 7】

偏波モード分散補償器を用いて光伝送線路上の偏波モード分散を補償する方法であって、  
前記偏波モード分散補償器の群遅延時間差が最大となるように、該群遅延時間差を調整し

、  
前記光伝送線路および偏波モード分散補償器の連鎖の主偏波状態を、該光伝送線路に入力  
される光信号の入力偏波状態に揃え、  
前記伝送線路および補償器の連鎖の主偏波状態を前記入力偏波状態に揃えたままで、該伝 40  
送線路および補償器の連鎖の主偏波状態の回転率が最小化されるまで、前記偏波モード分  
散補償器の群遅延時間差を削減する  
ことを特徴とする方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、伝送距離またはビットレートが伝送スパン（伝送線路）の P M D により制限さ  
れる場合に、高速光信号に対する P M D による信号歪みへの対策として用いられる偏波モ  
ード分散（P M D）補償器に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

より大容量の光伝送システムに対する需要が増大し続けている。1本の光ファイバを介して特定の時間内に伝送できるデータ量を増加させるには、主として2つの方法がある。1つは波長分割多重(WDM)であり、もう1つは時分割多重(TDM)である。

## 【0003】

数テラbit/sのオーダのデータレートを実現するには、TDMおよびWDMの組み合わせを用いる必要がある。各チャネルが搬送するビットレートを増加させる一方でWDMシステムのチャネル数を削減する方法には、いくつかの利点がある。過去のシステムは2.5Gbit/sで動作していたが、現在のシステムはチャネル当たり10Gbit/sを利用しており、将来のシステムは40Gbit/sあるいはより高いデータレートで動作するものと思われる。

10

## 【0004】

しかし、データレートの増大とともに、いわゆる偏波モード分散(PMD)という現象が光ファイバの伝送距離を制限する物理的な性質となる。非ゼロ復帰(NRZ)変調方式を用いた場合、例えば、5psのPMD値は、400psのビット持続時間を有する2.5Gbit/sのデータレートの信号には影響しない。しかし、同じ5psのPMD値は、10Gbit/s信号(NRZビット持続時間が100ps)の場合には信号歪みに寄与する可能性があり、40Gbit/s信号(NRZビット持続時間が25ps)はかなり歪ませることになる。

## 【0005】

20

さらに悪いことに、PMDは、シングルモードファイバの複屈折およびモード結合に対して環境的に依存する統計的な性質である。これは、瞬時の群遅延時間差(DGD)が、ある確率で、ファイバの平均DGD、すなわちPMDよりはるかに大きく、または小さくなり得ることを意味する。瞬時のDGDはマクスウェルの確率分布に従ったいわゆる1次PMDに一致し、ランダムモード結合による独自の統計分布に従う高次PMDが付加的に存在する。

## 【0006】

それは、例えば、2次PMD係数である、DGDスロープと主偏波状態(PSP)の回転率である。当業者にとって、高次PMDのいくつかの定義が存在することは周知である。ここで強調したいのは、所望の伝送距離に渡って蓄積されたPMDにより信号が許容できないほど大きな歪みを受けた場合、この種の信号劣化に対する対策として、活性的であり、かつ適応的に調整可能な補償方法が必要になるということである。

30

## 【0007】

電氣的補償スキームおよびハイブリッド光電補償スキームに加えて、全光学スキームが提唱されている。このうち、全光学補償スキームについて以下で説明する。

全補償スキームは、受信機側に歪み解析装置を必要とする。歪み解析装置は、信号の歪みが最小となるように補償装置のパラメータを適応的に調整する専用アルゴリズムを持つ制御ロジックに対して、フィードバックを行う。一般に、全光学1次PMD補償スキームは、以下の3つのカテゴリに分類することができる。

1. 送信機側に配置された偏波変換器

40

図1は、この種の補償器を含むシステムを示している。このシステムは、送信機11(Tx)、偏波変換器12(PC)、伝送スパン13、受信機14(Rx)、および歪みアナライザ15を含んでいる。

## 【0008】

このシステムでは、歪みアナライザ15が伝送スパン13上の光信号の歪みを解析し、偏波変換器12にフィードバック信号を出力する。このフィードバック信号に従って、偏波変換器12は、入力偏波状態を適応的に伝送スパン13の2つの入力PSPの1つに合わせる(T. Ono, Y. Yano, L. D. Garrett, J. A. Nagel, M. J. Dickerson, and M. Cvijetic, "10 Gb/s PMD compensation field experiment over 452 km using principal state transmission method," OFC'99, paper PD44, 1999)。

50

## 【0009】

補償器は、信号の偏波状態が伝送スパンの入力PSPの1つと揃っている場合、出力偏波状態が1次のオーダでは波長に依存しないという事実を利用している。これは、この発信条件の下で信号の歪みが最小となることを暗示している。

2. 受信機側に配置された偏波変換器とそれに続く偏波保持ファイバ(PMF)

図2は、この種の補償器を含むシステムを示している。このシステムは、送信機11、伝送スパン13、受信機14、偏波変換器21、PMF22、および歪みアナライザ23を含んでいる。偏波モード分散補償器(PMDC)は、偏波変換器21およびPMF22からなる。

## 【0010】

このシステムでは、偏波変換器21は、連結された伝送スパン13およびPMDCの入力主偏波状態(PSP)を入力偏波状態に合わせなければならない(C. Francia, F. B. Bruyere, J. P. Thiery, and D. Penninckx, "Simple dynamic polarisation mode dispersion compensator," Electronics Letters, Vol. 35, No. 5, pp. 414-415, 1999; H. Ooi, Y. Akiyama, and G. Ishikawa, "Automatic polarization-mode dispersion compensation in 40-Gbit/s transmission," OFC' 99, paper WE5, pp. 86-88, 1999)。

## 【0011】

この方法は、伝送スパンの瞬時のDGDがPMDCのPMFのDGDより幾分小さな値よりも小さい場合は、良好な結果を提示する。伝送スパンの瞬時のDGDがこの値を上回るか、あるいはPMDCのPMFのDGD値を超えると、PMFの高速固有状態を伝送スパンの低速出力PSPに合わせた方がよくなる。ここで、固有状態とは媒体の特性を表すものであり、偏波状態とは光信号または光の特性を表すものである。

## 【0012】

このような状況の下で、伝送スパンのDGDが部分的に補償される。連結された伝送スパンおよびPMDCの残りのDGDは、伝送スパンの瞬時のDGDとPMFのDGDの差分である。

3. 受信機側に配置された偏波変換器とそれに続く偏波ビームスプリッタ(PBS)、可変群遅延時間差線路、および偏波ビームコンバイナ(PBC)

図3は、この種の補償器を含むシステムを示している。このシステムは、送信機11、伝送スパン13、受信機14、偏波変換器31、PBS32、可変遅延器33、PBC34、および歪みアナライザ35を含んでいる。

## 【0013】

このシステムでは、偏波変換器31は、その高速偏波固有状態を適応的に伝送スパンの低速出力PSPに合わせ、さらにそのDGDを伝送スパンの瞬時のDGDに合わせなければならない(F. Heismann, D. A. Fishman, and D. L. Wilson, "Automatic compensation of first-order polarization mode dispersion in a 10Gb/s transmission system," ECOC' 98, pp. 529-530, 1998)。

## 【0014】

PMDCによる信号の歪みに対する対策となる、上述したすべてのスキームは、いわゆる1次PMDCのみを補償している。それらは、DGDおよびPSPが波長の関数であることを考慮していない。

## 【0015】

図4、5、および6は、PMDCがそれぞれ5、10、および20psのファイバにおけるDGDの波長に対する典型的な関数を示している。図4、5、および6では、1545nmと1555nmの間の波長領域におけるDGDの関数が示されている。図7、8、および9は、PMDCがそれぞれ5、10、および20psのファイバにおけるPSPの波長に対する典型的な変化を示している。図7、8、および9では、ポアンカレ球を用いて、1545nmと1555nmの間の0.01nm刻みの波長λの領域におけるPSPの変化が示されている。黒点は球の前面上の点を表し、白点は球の背面の点を表す。提示されたDGDおよびPSPのグラフは、明瞭性の観点からシミュレーション結果を採用したも

10

20

30

40

50

のである。

#### 【0016】

変調された信号のスペクトル幅は無限に小さいわけではない。変調された信号の中心波長のスペクトル成分は、1次補償の後ではPMDによる歪みを受けていないが、他のスペクトル成分はそれを受けている(C. D. Poole and R. E. Wagner, "Phenomenological approach to polarisation dispersion in long single-mode fibers," Electronics Letters, Vol. 22, No. 19, pp. 1029-1030, 1986)。さらに悪いことに、受信機側に配置された図2および3の補償スキームは、中心波長におけるDGDは補償するが、中心波長から離れたスペクトル成分に対しては付加的なPMDを追加する。

#### 【0017】

いわゆる高次PMDをも補償するためには、補償スキームのPMD特性を逆転して伝送スパンのPMD特性に一致させなければならない(R. Noe, D. Sandel, M. Yoshida-Dierolf, S. Hinz, V. Mirvoda, A. Schopflin, C. Glingener, E. Gottwald, C. Scheerer, G. Fischer, T. Weyrauch, and W. Haase, "Polarization mode dispersion compensation at 10, 20, and 40 Gb/s with various optical equalizers," Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 9, 1999)。

#### 【0018】

簡単に上述した1次補償スキームでは、信号の中心波長に対してこの条件が満たされるだけである。すべての、または少なくとも中心波長に近い信号のスペクトル成分に対して伝送スパンのPMD特性を一致させる方法により補償性能をさらに向上させるために、多段PMD補償スキームが提唱されている。

#### 【0019】

それは、偏波変換器および可変遅延線路(D. A. Fishman, F. L. Heismann, and D. L. Wilson, "Method and apparatus for automatic compensation of first-order polarization mode dispersion (PMD)," United States Patent No. 5,930,414)、または偏波変換器および固定DGD(例えば、PMF)(S. Hinz, D. Sandel, M. Yoshida-Dierolf, R. Noe, R. Wessel, and H. Suche, "Distributed fiberoptic PMD compensation of a 60 ps differential group delay at 40 Gbit/s," ECOC'99, pp. 11136-11137, 1999)の多段構成からなる。

#### 【0020】

図10は、前者の多段PMD補償スキームによるシステムを示している。このシステムは、第1乃至第n補償器41および歪みアナライザ42を含んでいる。各補償器41は、図3に示した偏波変換器31、PBS32、可変遅延器33、およびPBC34からなる。一方、図11は、後者の多段PMD補償スキームによるシステムを示している。このシステムは、第1乃至第n補償器51および歪みアナライザ52を含んでいる。各補償器51は、図2に示した偏波変換器21およびPMF22からなる。

#### 【0021】

当業者であれば、段数の増加とともに原理的な性能が向上することはよく理解できる。多段になればなるほど、PMDを伝送スパンのPMD特性により一致させることができる。しかし、追加された自由度により複雑さも増大する。増大した複雑さは、補償スキームのPMD特性を適応的に調整することを困難にするとと思われる。PMDの数学的記述は、いわゆるPMDベクトルを利用するものである(J. P. Gordon and H. Kogelnik, "PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers," PNAS, Vol. 97, No. 9, pp. 4541-4550, 2000)。

## PMDベクトル $\vec{P}$

#### 【0022】

は、次のように2つの成分 $\tau$ (DGD)および

10

20

30

40

$\bar{p}$  (P S P)

【 0 0 2 3 】

に分離することができる。

【 0 0 2 4 】

【数 1】

$$\bar{P}(\omega) = \tau(\omega) \cdot \bar{p}(\omega) \quad (1)$$

10

【 0 0 2 5 】

D G D は 1 次 P M D とも言われるのに対して、2 次 P M D パラメータは、次のように周波数  $\omega$  に関する

$\bar{P}$

【 0 0 2 6 】

を導出することにより計算される。

【 0 0 2 7 】

【数 2】

$$\frac{d\bar{P}(\omega)}{d\omega} = \frac{d\tau(\omega)}{d\omega} \cdot \bar{p}(\omega) + \tau(\omega) \cdot \frac{d\bar{p}(\omega)}{d\omega} \quad (2)$$

20

【 0 0 2 8 】

2 次 P M D は、偏波に依存する

$$\text{波長分散} \frac{d\tau(\omega)}{d\omega} \quad [\text{p s} / \text{n m}]$$

30

【 0 0 2 9 】

(D G D スロープ) 成分および P S P の

$$\text{回転率} \frac{d\bar{p}(\omega)}{d\omega} \quad [\text{r a d} / \text{n m}]$$

【 0 0 3 0 】

からなる。P S P の回転率は、ナノメートル当たりのラジアン数を単位として測定される。このことから、変調された信号のすべてのスペクトル成分はそれ自身に伴う P S P を有するという結果が導かれる。変調された信号の入力偏波状態に依存して、すべてのスペクトル成分のパワーはそれに伴う 2 つの P S P に分割され (パワーの分割比は、それぞれの波長における信号の入力偏波状態とファイバの P S P の間の角度に依存する)、これによってそれらの 2 つの偏波成分は D G D を受ける。

40

【 0 0 3 1 】

さらに、3 次 P M D パラメータは、次のようにして導出される。

【 0 0 3 2 】

【数 3】

$$\frac{d^2\bar{p}(\omega)}{d\omega^2} = \frac{d^2\tau(\omega)}{d\omega^2} \cdot \bar{p}(\omega) + \tau(\omega) \cdot \frac{d^2\bar{p}(\omega)}{d\omega^2} + 2 \cdot \frac{d\tau(\omega)}{d\omega} \cdot \frac{d\bar{p}(\omega)}{d\omega} \quad (3)$$

【 0 0 3 3 】

$$\frac{d^2\tau(\omega)}{d\omega^2} \text{ および } \frac{d^2\bar{p}(\omega)}{d\omega^2}$$

【 0 0 3 4 】

は、それぞれ波長分散スロープおよび P S P 回転の変化率を表す。伝送スパンの P M D ベクトルと P M D 補償器の P M D ベクトルのベクトル和が、少なくとも変調された信号のスペクトル帯域幅内でゼロである場合、P M D による信号の歪みは完全に緩和される。

【 0 0 3 5 】

完全に緩和するためには、偏波変換器と交互に配置された膨大な数の D G D セクションを必要とするため (Y. Li, A. Eyal, and A. Yariv, "Higher order error of discrete fiber model and asymptotic bound on multistaged PMD compensation," Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, No. 9, pp. 1205-1213, 2000)、制御速度が制限されるとともに、必要とする部品の数と全体の大きさが、少なくとも経済的観点から見て、この種の完全な、あるいは完全に近い補償スキームを魅力のないものにしている。

【 0 0 3 6 】

段数がより少なければ、高次 P M D による残りの歪みが設計上補償されないままとなる (P. Ciprut et al., "Second-order polarization mode dispersion: Impact on analog and digital transmissions," Journal of Lightwave Technology, Vol. 16, No. 5, pp. 757-771, 1998; C. Francia, F. Bruyere, D. Penninckx, and M. Chbat, "PMD second-order effects on pulse propagation in single-mode optical fibers," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, No. 12, pp. 1739-1741, 1998)。しかし、それほど大きくない特定の P M D 値を持つ所与の伝送スパンに対しては、そのようなスキームでも P M D ベクトルを逆転して部分的に一致させることができる。このことは、軽減されて残されたペナルティとして、システム設計において考慮しなければならない。

【 0 0 3 7 】

図 1 2 は、実際のファイバにおいて発生する 1 次 (D G D) および 2 次 (P S P 回転率) P M D パラメータがカバーする領域の明確なイメージを与えている。P M D 値が 4、8、および 16 p s のシングルモードファイバ (S M F) に対して、1000 個の直線状複屈折セグメントを有する実ファイバモデルを用いて  $5 \times 10^5$  回の試行が行われた (W. Weiershausen, R. Leppla, F. Kuppers, and H. Scholl, "Polarization-mode dispersion in fibre transmission: Theoretical approach, impact on systems, and suppression of signal-degradation effects," ECOC'99, pp. 11130-11133, 1999)。図 1 2 は、瞬時の D G D に対する P S P 回転率を示している。瞬時の D G D が周知のマクスウェルの確率分布 (ここでは示されていない) に従っているのに対して、最大発生 P S P 回転率は D G D の増加とともに減少している。

【 発明の開示 】

【 0 0 3 8 】

本発明の課題は、複雑さを削減した構成で、光伝送線路の 1 次および高次 P M D を補償する P M D C を提供することである。

本発明の第 1 の局面による P M D C は、主偏波状態 (P S P) 調整器およびモード結合調整器を備える。P S P 調整器は、光伝送線路および P M D C の連鎖の P S P を、光伝送線路に入力される光信号の入力偏波状態 (S O P) に揃える。モード結合調整器は、P M D C 内のモード結合を調整する。

【 0 0 3 9 】

10

20

30

40

50

P S P 調整器は、例えば、偏波変換器に対応し、任意の入力 S O P を任意の出力 S O P に変換する。モード結合調整器は、モード結合を変更することで、P M D C の D G D と P S P 回転率の両方を調整することができる。P S P 調整器はモード結合調整器から分離されており、独立に制御可能であるため、1 次および高次 P M D が補償される。モード結合調整器は、任意の入力 S O P を任意の出力 S O P に変換することはできないが、偏波変換器より簡単な装置により実現される。

#### 【0040】

このように、第1の局面による P M D C は、複雑さを削減した構成で、1 次 P M D のみならず高次 P M D をも補償する。

本発明の第2の局面による P M D C は、P S P 調整器、P S P 調整器に続く第1の複屈折素子、第1の複屈折素子に続くモード結合調整器、およびモード結合調整器に続く第2の複屈折素子を備える。P S P 調整器は、光伝送線路および P M D C の連鎖の P S P を、光伝送線路に入力される光信号の入力 S O P に揃える。モード結合調整器は、P M D C 内のモード結合を調整する。

#### 【0041】

P S P 調整器は、例えば、偏波変換器に対応し、第1および第2の複屈折素子の各々は、P M D をもたらす P M F のような複屈折装置に対応する。モード結合調整器は、第1および第2の複屈折素子のモード結合を変更することで、P M D C の D G D と P S P 回転率の両方を調整することができる。モード結合調整器は、本発明の第1の局面と同様に、偏波変換器より簡単な装置により実現される。

#### 【0042】

このように、第2の局面による P M D C は、複雑さを削減した構成で、1 次 P M D のみならず高次 P M D をも補償する。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

#### 【0043】

以下、図面を参照しながら、本発明の好ましい実施形態を詳細に説明する。

P M D 補償スキームは、原理的には変調された信号の中心波長において、補償スキームの特性が逆転して伝送スパンの D G D および P S P 回転率と一致するように、その特性を調整することのできるものであり、例えば、図13に示すような2段の偏波変換器および P M F からなる。

#### 【0044】

図13のシステムは、送信機11、伝送スパン13、受信機14、第1段偏波変換器61、第1段 P M F 62、第2段偏波変換器63、第2段 P M F 64、および歪みアナライザ65を含んでいる。歪みアナライザ65は、第2段 P M F 64の後方の光信号の歪みを解析し、偏波変換器61および63にフィードバック信号を出力する。この場合、偏波変換器61および63と P M F 62および64とが P M D C を形成し、偏波変換器61および63は、例えば、以下の方法により実現される。

- 多重回転波長板
- 多重ファイバスクイーズ
- 複数の回転可能ファイバコイル
- 集積光学実現手段（例えば、L i N b O<sub>3</sub>基板上での）
- Soleil-Babinet補償器（結晶またはファイバ光学的な）
- 多重可変複屈折波長板（例えば、L i N b O<sub>3</sub>、特殊セラミクス）
- 多重セクションの液晶
- 複数の温度調整 P M F セクション
- ファラデー効果を利用した多重ファイバセクション

または上記原理スキームの組み合わせ

この2段補償スキームでは、P M F 62および64の間の偏波変換器63はモード結合調整器として動作して、これらの P M F の D G D および P S P 回転率を調整し、P M F 62の前方の偏波変換器61は P S P 調整器として動作して、伝送スパン13の P S P に対す

10

20

30

40

50



るPMDCのPSPを調整する。それは、さらに、PMDCの主状態が回転する方向を制御する。このスキームは、中心波長におけるDGDを補償するだけでなくPSP回転率を調整することもできるので、その性能は原理的に1段補償スキームを上回っている。

【0045】

2段補償スキームを詳細に観察すると、各段は1つの偏波変換器と1本のPMFからなっており、性能や調整領域を制限することなく複雑さを削減できることが分かる。

2本のPMFの連鎖のDGD（1次PMD）がそれらのPMFの固有状態間の相対角度 $\phi$ にのみ依存することは周知である。そのDGDは、例えば、角度 $\phi$ の機械的回転という方法で調整可能であり、次式に従う。

【0046】

【数4】

$$DGD = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + 2\tau_1\tau_2 \cos(2\phi)} \quad (4)$$

【0047】

ただし、 $\tau_1$ および $\tau_2$ は、それぞれ第1および第2のPMFのDGD値である。

本発明の主要な成果は、DGDのみならずPSP回転率（2次PMDの一部）もPMFの固有状態間の相対角度 $\phi$ にのみ依存するということである。PMFの固有軸間の相対角度 $\phi$ を一定に保ったままでそれらの固有軸を回転させれば、DGDやPSP回転率が変化することはない。この振る舞いは、ポアンカレ球を用いて図14のように示される。

【0048】

図14において、黒点は、相対角度 $\phi$ が $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、...、 $80^\circ$ の値を取るときの第2偏波変換器および第2PMFの連鎖の固有状態を表し、黒点71は第1PMFの固有状態に対応する。白点は、 $1549.95\text{ nm}$ と $1550.05\text{ nm}$ の間の波長領域において相対角度 $\phi$ が同じ値を取るときの第1PMF、第2偏波変換器、および第2PMFの連鎖の主状態を表す。角度 $\phi$ の増加（ $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ ）とともに、DGDは（ $\tau_1 + \tau_2$ から $|\tau_1 - \tau_2|$ に）減少し、PSP回転率は増加している。左側の球72から右側の球73にかけて、固有軸間の相対角度 $\phi$ が一定に保たれたままでそれらの固有軸の絶対角度が変化している。この種の変化では、DGDおよびPSP回転率の関数は変化しない。

【0049】

図15は、2段補償スキームの調整領域をさらに明確にするために、調整されたDGDおよびPSP回転率の関係を示している。この例では、10、20、および40 psのDGDセクション（段）を用いた2段補償器におけるDGDおよびPSP回転率の依存性が示されている。偏波変換器のDGDは正しく構築されていれば無視できるので、セクション当たりのDGDはPMFのDGDにほぼ等しくなる。完全機能型の偏波変換器がPMFセクション間に配置されているか、あるいはPMFが相互に回転するかに関わらず、同じグラフが得られる。

【0050】

図16および17は、PMFの固有軸間の角度に対するDGDおよびPSP回転率の依存性をそれぞれ示している。この例では、10、20、および40 psのDGDセクションを用いた2段補償スキームにおける依存性が示されている。

【0051】

例えば、偏波変換器を可変複屈折波長板（ $0 - 2\pi$ 位相領域）で作成した場合、任意の入力SOPを任意の出力SOPに変換するために少なくとも3枚の波長板が必要であり、各波長板を制御するために制御信号が1つずつ必要である。この方法では、2段PMDCに、歪みアナライザからのフィードバック信号が少なくとも6つ必要となる。PMF間の第2偏波変換器を、例えば、1枚の可変複屈折波長板により実現できる移相器のようなモード結合調整器で置き換えれば、波長板に必要な制御信号の数は6から4に削減される。偏波変換器は偏波特性を極座標系で回転させるので、複雑さが削減されたこのような2段PMDCでは、自由度が4から3に削減される。

10

20

30

40

50

## 【0052】

複雑さが削減された上述の2段PMD補償スキームの実現方法としては、以下のようなものが可能である。

## 1. PMFの機械的回転

図18は、この種の2段PMDを含むシステムを示している。このシステムは、第2偏波変換器63がモード結合調整器として動作する機械的回転器71に置き換えられている点を除いて、図13に示したものと類似した構成を有する。

## 2. PMF間への回転可能波長板（位相板）の挿入

図19は、この種の2段PMDを含むシステムを示している。このシステムは、第2偏波変換器63が回転可能波長板81に置き換えられている点を除いて、図13に示したものと類似した構成を有する。回転可能波長板81は、可変固有軸を有する固定移相板であり、モード結合調整器として動作する。

## 3. PMF間への可変複屈折波長板の挿入

図20は、この種の2段PMDを含むシステムを示している。このシステムは、第2偏波変換器63が可変複屈折波長板91に置き換えられている点を除いて、図13に示したものと類似した構成を有する。可変複屈折波長板91は、可変移相板であり、モード結合調整器として動作する。

## 【0053】

図19および20に示したシステムでは、固有軸が一致するような角度に揃ったとき偏波保持が最良となる。図19のシステムでは、回転可能波長板の位相遅延は $\lambda/2$ のとき最良となる。これは、図18の機械的回転により実現可能なものと同じ調整領域を保証していることになる。位相遅延がより小さい場合、調整領域が削減されるが、位相遅延がより大きい場合、調整領域は削減されずに、回転角に対するDGDおよびPSP回転率の依存性がより強くなる。図20のシステムでは、可変複屈折波長板91は、その固有軸がPMFの固有軸に対して $45^\circ$ の角度を成すとき最良となる。機械的回転によるものと同じ調整領域を実現するためには、複屈折特性は0から $2\pi$ の間で可変でなければならない。

## 【0054】

3つの実現方法はすべて、縦列接続された偏波変換器とPMFを利用する補償スキームに比べて、動作領域を制限することなく複雑さが削減されるという利点を持っている。このことは、必要となる制御ロジックを原理的に単純化し、制御アルゴリズムが補償器の特性を伝送スパンのPMD特性に合わせて適応的に変更する速度を向上させることになる。

## 【0055】

2つのセクションのPMFはその中を伝搬する光ビームにDGDをもたらすが、任意の複屈折素子（またはDGD装置）を用いてDGDをもたらすことも可能である。これは以下のような方法で実現できる。

1. 複屈折結晶（例えば、二酸化チタン（ $\text{TiO}_2$ ）、バナジン酸イットリウム（ $\text{YVO}_4$ ）、天然方解石（ $\text{CaCO}_3$ ））

2. DGDの実現に基材（ $\text{LiNbO}_3$ ）の複屈折特性を用いた集積光学装置

3. PBS、複数の異なる経路長、およびPBCの組み合わせ

さらに、提唱した2段補償スキームの調整領域を伝送スパンのPMD値に適応させるために、2つのセクションに対して必ずしも同じではないDGDを選択することが可能である。

## 【0056】

物理的な観点から見て可能な2段PMDの制御アルゴリズムを次に説明する。

## 第1の動作方法

a) モード結合調整器により、PMDのDGDを最大（PSP回転率 $=0^\circ/\text{GHz}$ ）となるように調整する。

b) 第1偏波変換器により、システム全体（伝送スパンおよびPMDの連鎖）のPSPを、送信機により伝送スパンに入力される光信号の入力SOPに揃える。→1次簡易補償

c) モード結合調整器により、システム全体のPSPを入力SOPに揃えたままでシステ

10

20

30

40

50

ム全体のPSP回転率が最小化されるように、PMDのDGDを削減する。→2次PSP回転率補償

d) PMDのDGDが伝送スパンのDGDより小さくなるまで、以下に述べる第2の動作方法を実行する。

#### 第2の動作方法

a) モード結合調整器により、PMDのDGDを伝送スパンのDGDと同じになるように調整する。

b) 第1偏波変換器により、PMDのPSPを伝送スパンの出力PSPと揃うまで回転させる。

第1の動作方法のa) - c)の動作を実行することにより、比較的広い波長領域のスペクトル成分において、すなわち、中心波長のみならず領域内の他のスペクトル成分においても、システム全体のPSPが入力SOPに揃えられる。 10

#### 【0057】

しかしながら、PMDの統計的性質により、伝送スパンのDGDがPMDの調整可能DGDより大きくなることもある。この場合、第1の動作方法はもはや適用できず、PMDは第2の動作方法に従って動作を行う。伝送のDGDが調整可能DGDの最大値よりわずかに大きいだけであれば、灰色領域となる。

#### 【0058】

このような領域では、第1の動作方法の方が第2の動作方法より高い信号改善を示すものと思われる。伝送スパンのDGDとPMDの最大DGDの差が大きければ大きいほど、第1の動作方法が成功する見込みは小さくなる。また、伝送スパンのDGDがPMDの最大DGDより小さくても、第1の動作方法がよりうまく働くことが指摘できる。この領域では2つの方法が択一的に用いられ、一般に、いずれの方法がよりうまくいくかは決めることができない。 20

#### 【0059】

実施形態の説明ではPMD補償スキームに焦点を当てているが、PMD補償システムは、制御ロジックが補償スキームの可変パラメータを適応的に調整できるように、信号歪みについての情報を伝えるフィードバック信号をさらに必要とする。提唱した2段スキームのPMDを実現するために、既に提唱されている任意のスキームを適用可能である。この中には、スペクトルホールバーニング (C. Glingener, A. Schopflin, A. Farbert, G. Fischer, R. Noe, D. Sandel, S. Hinz, M. Yoshida-Dierolf, V. Mirvoda, G. Feise, H. Herrmann, R. Ricken, W. Sohler, and F. Wehrmann, "Polarization mode dispersion compensation at 20 Gb/s with a compact distributed equalizer in LiNbO<sub>3</sub>," OFC'99, paper PD29, 1999; G. Ishikawa and H. Ooi, "Polarization-mode dispersion sensitivity and monitoring in 40-Gbit/s OTDM and 10-Gbit/s NRZ transmission experiments," OFC'98, paper WC5, pp. 117-119, 1998)、偏光度 (N. Kikuchi and S. Sasaki, "Polarization-mode dispersion (PMD) detection sensitivity of degree of polarization method for PMD compensation," ECOC'99, pp. 118-119, 1999; H. Rosenfeldt, R. Ulrich, U. Feiste, R. Ludwig, H. G. Weber, and A. Ehrhardt, "PMD compensation in 10 Gbit/s NRZ field experiment using polarimetric error signal," Electronics Letters, Vol. 36, No. 5, pp. 448-450, 2000)、またはアイオープニング測定が含まれるが、これに限定されるわけではない。 30 40

#### 【0060】

このような実際のPMDでは、歪みアナライザが制御ロジックに対して最大化すべき指標を提供する。したがって、PMDの調整パラメータを変更することにより、歪みアナライザからのフィードバック信号がまさに最大化される。こうして、制御ロジックは物理的観点から見て最良の動作方法を自動的に見出す。

#### 【0061】

本発明によれば、多段補償スキームにより、1次PMDのみならず高次PMDも補償され、波長領域の中心波長のPMDのみならず他のスペクトル成分のそれも補償される。この 50

ように、P M D C の性能は従来の 1 段 P M D C のそれよりも高くなる。

【 0 0 6 2 】

さらに、完全機能型の偏波変換器の代わりにモード結合調整器を用いることで、性能や調整領域を制限することなく、P M D C の複雑さが削減される。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 6 3 】

【図 1】第 1 の 1 次 P M D 補償スキームを示す図である。

【図 2】第 2 の 1 次 P M D 補償スキームを示す図である。

【図 3】第 3 の 1 次 P M D 補償スキームを示す図である。

【図 4】P M D が 5 p s であるファイバにおける D G D の波長に対する関数を示す図である。 10

【図 5】P M D が 1 0 p s であるファイバにおける D G D の波長に対する関数を示す図である。

【図 6】P M D が 2 0 p s であるファイバにおける D G D の波長に対する関数を示す図である。

【図 7】P M D が 5 p s であるファイバにおける P S P の波長に対する変化を示す図である。

【図 8】P M D が 1 0 p s であるファイバにおける P S P の波長に対する変化を示す図である。

【図 9】P M D が 2 0 p s であるファイバにおける P S P の波長に対する変化を示す図である。 20

【図 1 0】第 1 の多段 P M D 補償スキームを示す図である。

【図 1 1】第 2 の多段 P M D 補償スキームを示す図である。

【図 1 2】瞬時の D G D に対する P S P 回転率を示す図である。

【図 1 3】2 段 P M D 補償スキームを示す図である。

【図 1 4】P M F の固有軸間の相対角度が変化しないような、それらの固有軸の回転を示す図である。

【図 1 5】調整された D G D と P S P 回転率の関係を示す図である。

【図 1 6】P M F の固有軸間の角度に対する D G D の依存性を示す図である。

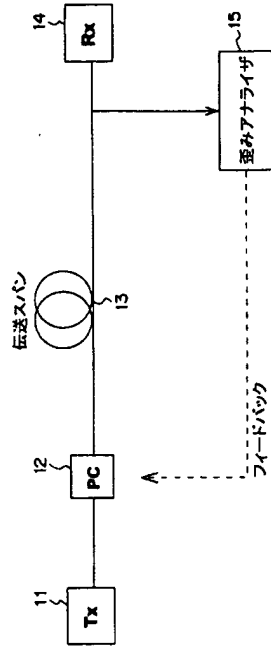
【図 1 7】P M F の固有軸間の角度に対する P S P 回転率の依存性を示す図である。 30

【図 1 8】第 1 の 2 段 P M D C を示す図である。

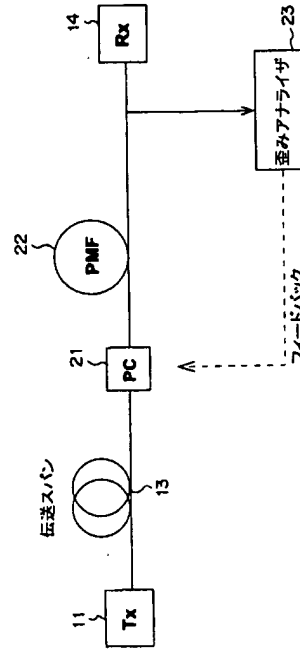
【図 1 9】第 2 の 2 段 P M D C を示す図である。

【図 2 0】第 3 の 2 段 P M D C を示す図である。

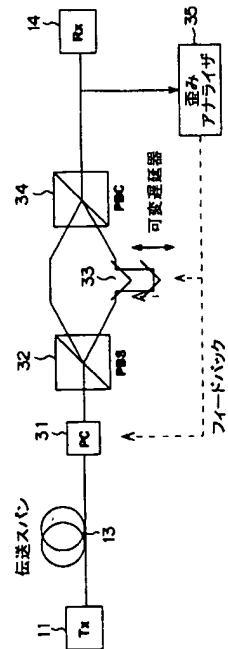
【図 1】



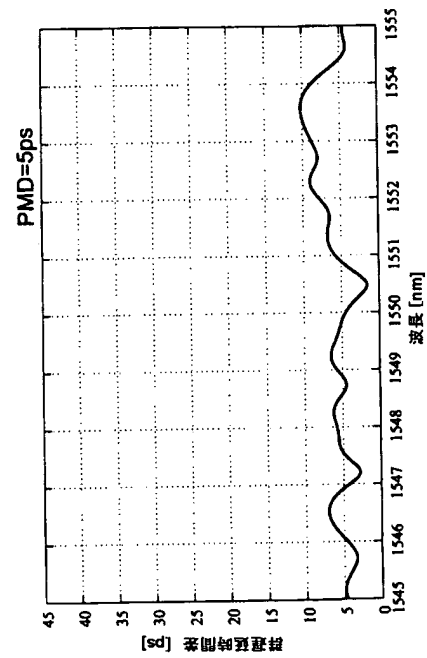
【図 2】



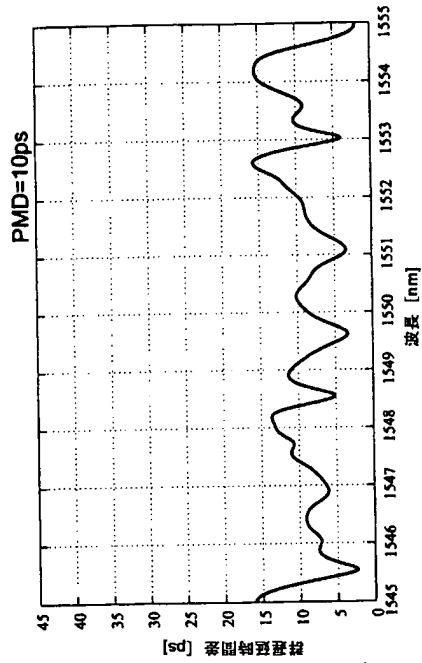
【図 3】



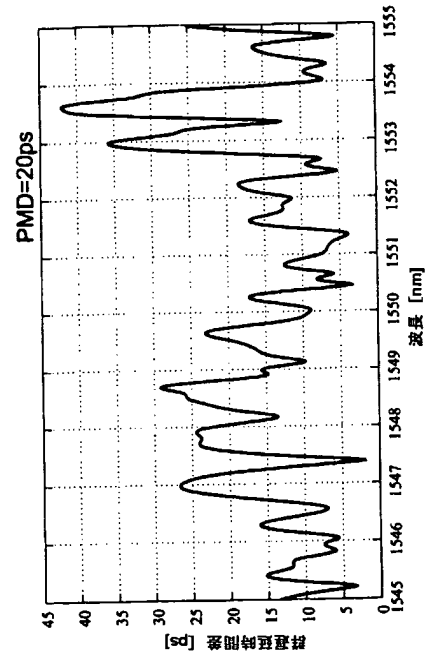
【図 4】



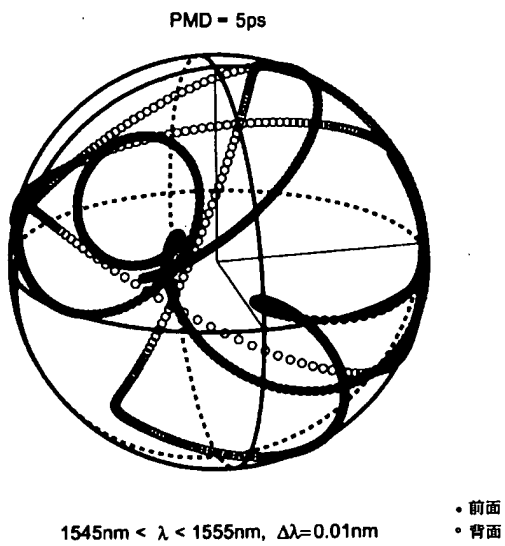
【図 5】



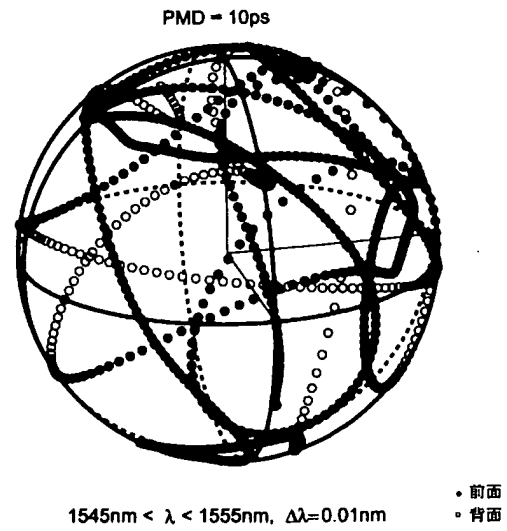
【図 6】



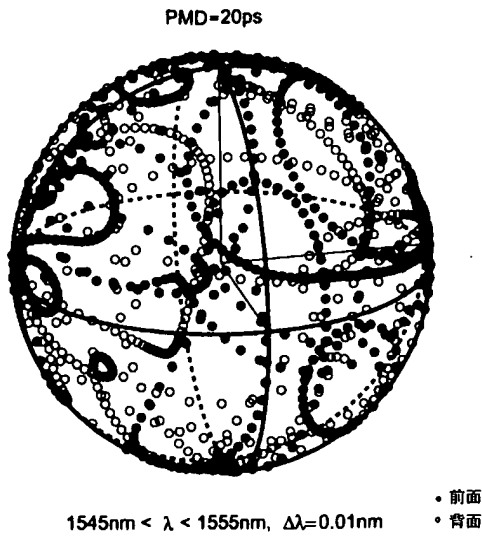
【図 7】



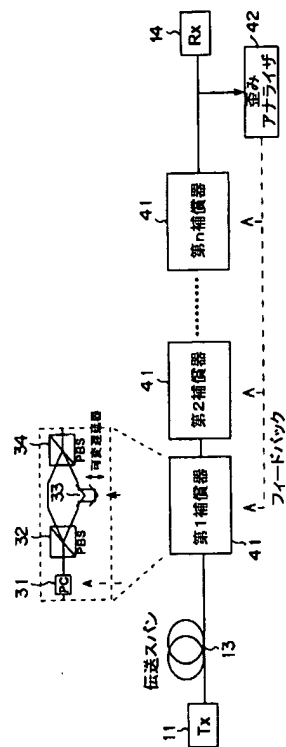
【図 8】



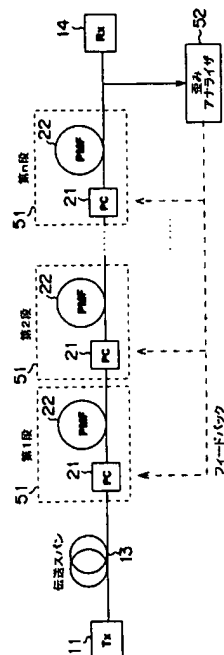
【図 9】



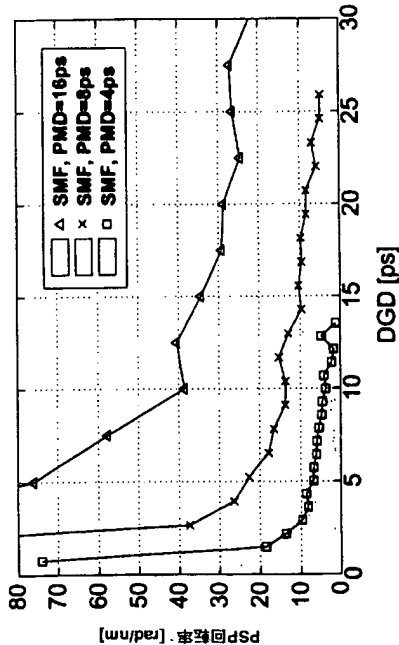
【図 10】



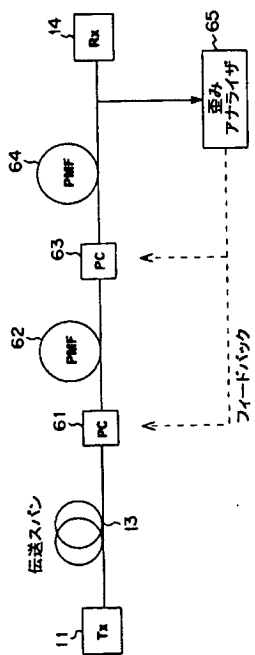
【図 11】



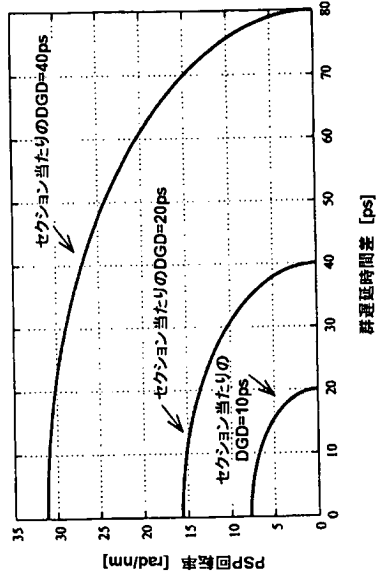
【図 12】



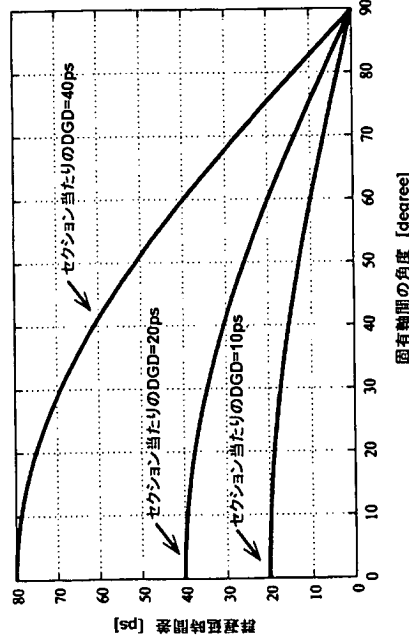
【図13】



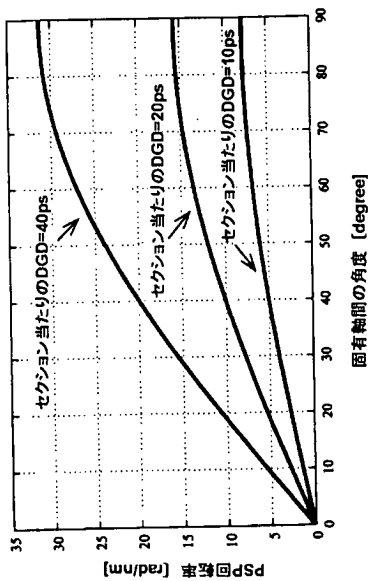
【図15】



【図16】

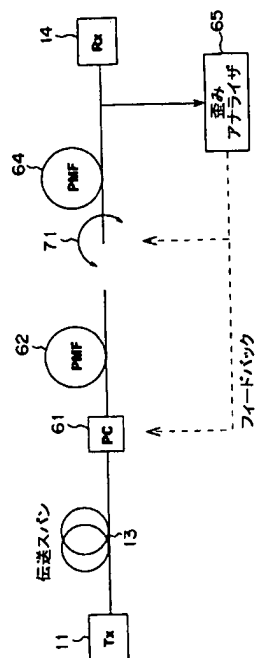


【図17】

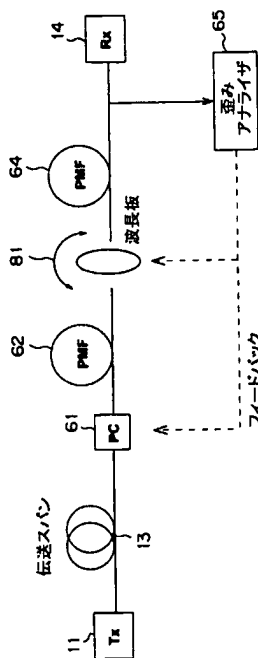




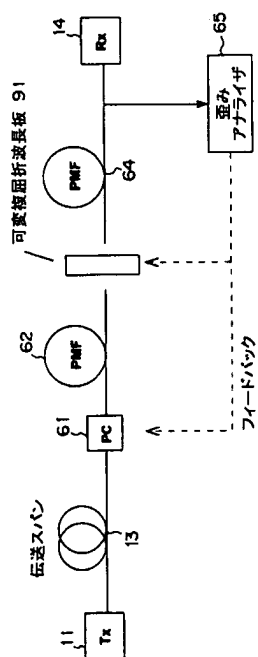
【図 18】



【図 19】



【図 20】



## 【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

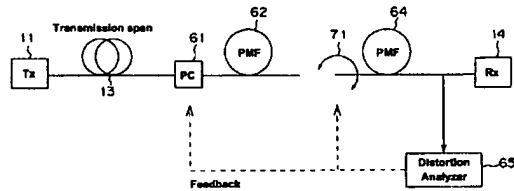
(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau(43) International Publication Date  
13 March 2003 (13.03.2003)

PCT

(10) International Publication Number  
WO 03/021821 A1

- (51) International Patent Classification: H04B 10/18, 211-8588 (JP), ISHIKAWA, George (JP/JP); c/o FUJITSU LIMITED, 1-1, Kamikodanaka 4-chome, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588 (JP).
- (11) International Application Number: PCT/JP01/07567
- (22) International Filing Date: 31 August 2001 (31.08.2001)
- (74) Agent: OSHIGA, Yoshiyuki, 3rd Fl., Nihoncho Building, 8-30, Nishi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0084 (JP).
- (25) Filing Language: English
- (81) Designated States (national): CN, JP, US.
- (26) Publication Language: English
- (84) Designated States (regional): European patent (DE, FR, GB).
- (71) Applicant (for all designated States except US): FUJITSU LIMITED (JP/JP); 1-1, Kamikodanaka 4-chome, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588 (JP).
- Published:  
with international search report
- (72) Inventors; and  
(73) Inventors/Applicants (for US only): RASMUSSEN, Jens C. (DE/JP); c/o FUJITSU LIMITED, 1-1, Kamikodanaka 4-chome, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588 (JP).
- For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: POLARIZATION MODE DISPERSION COMPENSATOR



WO 03/021821 A1

(57) Abstract: A polarization converter followed by two PMF's adjust principal states of polarization (PSP) of a PMD compensator against PSP of an optical transmission line, and a mode-coupling adjuster between the PMF's adjust a differential group delay and a PSP rotation rate of the PMF's.

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

1

## DESCRIPTION

## POLARISATION MODE DISPERSION COMPENSATOR

5

## Technical Field

The present invention relates to a polarization mode dispersion (PMD) compensator which is used to countermeasure signal distortion due to PMD for high-speed optical signals in the case the transmission distance or bit-rate is limited by the PMD of the transmission span (transmission line).

## Background Art

15 The demand for higher capacity of optical transmission systems is increasing continuously. To increase the amount of data which can be transmitted in a specific amount of time through one optical fiber two methods exist in principal. While one method is wavelength division multiplexing (WDM), the other method is time division multiplexing (TDM).

To realize data-rates in the order of several Terabit/s a combination of TDM and WDM has to be used. Decreasing the number of channels in a WDM system while  
25 increasing the bit-rate each channel transports has

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

2

several advantages. Past systems operated with 2.5 Gbit/s, current systems make use of 10 Gbit/s per channel and future systems will operate with 40 Gbit/s or even higher data-rates.

5 But with increasing data-rates a phenomenon, the so called polarization mode dispersion (PMD), becomes a transmission distance limiting physical property of an optical fiber. A PMD value of e.g. 5 ps does not affect a signal with a data-rate of 2.5 Gbit/s with a bit-duration  
10 of 400 ps in the case nonreturn-to-zero (NRZ) modulation format is used. But the same PMD value of 5 ps can contribute to signal distortion in the case of 10 Gbit/s signals (NRZ bit-duration equals 100 ps) and highly distorts a 40 Gbit/s signal (NRZ bit-duration equals  
15 25 ps).

Even more worse, PMD is a statistical property due to the environmental dependence of birefringence and mode-coupling of a single-mode fiber. This means that, with some probability, the instantaneous differential  
20 group delay (DGD) can be much higher or lower than the mean DGD, i.e. PMD, of the fiber. While the instantaneous DGD is just the so called 1st-order PMD which follows a Maxwellian probability distribution, additionally higher-order PMD with an own statistical distribution  
25 due to the random mode-coupling exists.

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

3

Those are for example the DGD slope and the rotation rate of the principal states of polarization (PSP), being the 2nd-order PMD coefficients. For those who are skilled in the art, it is well known that several definitions of higher-order PMD exist. It is to be emphasized here, that in the case a signal experiences unacceptable high distortion due to accumulated PMD over the desired transmission distance, an active and adaptively adjustable compensation method is required to countermeasure this type of signal degradation.

Beside electrical and hybrid electric-optical compensation schemes all-optical schemes have been proposed. Among them, the all-optical compensation schemes will be discussed in the following.

All compensation schemes require a distortion analyzing device at the receiver side. The distortion analyzing device provides feedback to a control logic with a dedicated algorithm to adaptively adjust the parameters of a compensating device such that the signal experiences a minimum distortion. In general one can classify all-optical 1st-order PMD compensation schemes into the following three categories:

1. Polarization converter located at the transmitter side

Fig. 1 shows a system including this type of

WO 03/021821

PCT/JPO1/07567

4

compensator. The system includes a transmitter 11 (Tx), a polarization converter 12 (PC), a transmission span 13, a receiver 14 (Rx) and a distortion analyzer 15.

In this system the distortion analyzer 15 analyzes distortion of an optical signal on the transmission span 13 and outputs a feedback signal to the polarization converter 12. According to the feedback signal the polarization converter 12 adaptively adjusts the input state of polarization to one of the two input PSP of the transmission span 13 (T. Ono, Y. Yano, L. D. Garrett, J. A. Nagel, M. J. Dickerson, and M. Cvijetic, "10 Gb/s FMD compensation field experiment over 452 km using principal state transmission method," OFC'99, paper PD44, 1999).

The compensator makes use of the fact that in the case the signal's state of polarization is aligned to one of the input PSP of the transmission span, the output state of polarization does not depend on wavelength to the first order. This further implies that under this launch condition the signal experiences least distortion.

2. Polarization converter followed by a polarization maintaining fiber (PMF) located at the receiver side

Fig. 2 shows a system including this type of compensator. The system includes the transmitter 11,

the transmission span 13, the receiver 14, a polarization converter 21, a PMF 22 and a distortion analyzer 23. The polarization mode dispersion compensator (PMDC) consists of the polarization converter 21 and the PMF 22.

In this system the polarization converter 21 has to adaptively adjust the input principal state of polarization (PSP) of the concatenated transmission span 13 and PMDC to the state of input polarization (C. Francia, F. B. Bruyère, J. P. Thiéry, and D. Penninckx, "Simple dynamic polarisation mode dispersion compensator," Electronics Letters, Vol. 35, No. 5, pp. 414-415, 1999; H. Ooi, Y. Akiyama, and G. Ishikawa, "Automatic polarization-mode dispersion compensation in 40-Gbit/s transmission," OFC'99, paper WE5, pp. 86-88, 1999).

This shows good results until the instantaneous DGD of the transmission span is lower than a value being somewhat lower than the DGD of the PMDC's PMF. If the instantaneous DGD of the transmission span becomes higher than this value or exceeds the PMDC's PMF DGD value, a better method is to adjust the fast eigenstate of the PMF to the slow output PSP of the transmission span. Here, an eigenstate represents a characteristic of a medium and a state of polarization represents a characteristic of an optical signal or light.

Under those circumstances the transmission span's DGD is partly compensated for. The residual DGD of the concatenated transmission span and PMDC is the difference between the instantaneous DGD of the transmission span and the DGD of the PMF.

3. Polarization converter followed by a polarization beam splitter (PBS), an adjustable differential group delay line and a polarization beam combiner (PBC) located at the receiver side

Fig. 3 shows a system including this type of compensator. The system includes the transmitter 11, the transmission span 13, the receiver 14, a polarization converter 31, a PBS 32, an adjustable delay 33, a PBC 34 and a distortion analyzer 35.

In this system the polarization converter 31 has to adaptively adjust its fast eigenstate of polarization to the slow output PSP of the transmission span and, furthermore, adjust its DGD to the instantaneous DGD of the transmission span (F. Heismann, D. A. Fishman, and D. L. Wilson, "Automatic compensation of first-order polarization mode dispersion in a 10Gb/s transmission system," ECOC'98, pp. 529-530, 1998).

All of the above mentioned schemes to countermeasure signal distortion due to PMD only compensate for so called 1st-order PMD. They do not take



into account that the DGD and the PSP are functions of wavelength.

Figs. 4, 5 and 6 show typical functions of the DGD over wavelength, respectively, of fibers with PMD = 5, 10 and 20 ps. In Figs. 4, 5 and 6, the functions of the DGD are shown in a range of wavelength between 1545 nm and 1555 nm. Figs. 7, 8 and 9 show typical variation of the PSP over wavelength, respectively, of fibers with PMD = 5, 10 and 20 ps. In Figs. 7, 8 and 9, the variation of the PSP are shown in a range of wavelength  $\lambda$  between 1545 nm and 1555 nm at 0.01-nm intervals using the Poincaré sphere representation. A black point represents a point on the front of the sphere, while a white point represents a point on the back of it. The presented graphs of the DGD and the PSP are taken from simulation studies for clarity reasons.

The spectral width of a modulated signal is not infinitely small. While the spectral component at the center wavelength of a modulated signal does not experience distortion due to PMD after 1st-order compensation, the other spectral components do (C. D. Poole and R. E. Wagner, "Phenomenological approach to polarisation dispersion in long single-mode fibers," Electronics Letters, Vol. 22, No. 19, pp. 1029-1030, 1986). Even more worse, the compensation schemes shown

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

8

in Figs. 2 and 3, which are located at the receiver side, compensate for the DGD at the center wavelength but add additional PMD for the spectral components being apart from the center wavelength.

5 To compensate also for so called higher-order PMD, the PMD characteristic of the compensation scheme must reversely match the PMD characteristic of the transmission span (R. Noé, D. Sandel, M. Yoshida-Dierolf, S. Hinz, V. Mirvoda, A. Schöpflin, C. Glingener, E. Gottwald, C. Scheerer, G. Fischer, T. Weyrauch, and W. Haase, "Polarization mode dispersion compensation at 10, 20, and 40 Gb/s with various optical equalizers," 10 Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 9, 1999).

For the above shortly discussed 1st-order 15 compensation schemes this can only be fulfilled for the center wavelength of the signal. To further improve the compensation performance by means of matching the PMD characteristic of the transmission span for all or at least the spectral components of the signal near the 20 center wavelength, multi-stage PMD compensation schemes have been proposed.

Those are either composed of stages comprising a polarization converter and a variable delay line (D. A. Fishman, F. L. Heismann, and D. L. Wilson, "Method 25 and apparatus for automatic compensation of first-order

polarization mode dispersion (PMD)," United States Patent No. 5,930,414) or a polarization converter and a fixed DGD (e.g. PMF) (S. Hinz, D. Sandel, M. Yoshida-Dierolf, R. Noé, R. Wessel, and H. Suche, 5 "Distributed fiberoptic PMD compensation of a 60 ps differential group delay at 40 Gbit/s," ECOC'99, pp. II 136-II 137, 1999).

Fig. 10 shows a system according to the former multi-stage PMD compensation scheme. This system 10 includes 1st through nth compensators 41 and a distortion analyzer 42. Each of the compensators 41 consists of the polarization converter 31, the PBS 32, the adjustable delay 33 and the PBC 34 shown in Fig. 3. While Fig. 11 shows a system according to the latter multi-stage PMD 15 compensation scheme. This system includes 1st through nth compensators 51 and a distortion analyzer 52. Each of the compensators 51 consists of the polarization converter 21 and the PMF 22 shown in Fig. 2.

To those who are skilled in the art, it is well 20 understood that with an increasing number of stages the principle performance will increase. The more stages are used the better the PMD characteristic of the transmission span can be matched by the PMDC. But also the complexity due to the added degrees of freedom 25 increases. The increased complexity will make it

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

10

difficult to adaptively adjust the PMD characteristic of the compensation scheme. A mathematical description of PMD makes use of the so called PMD vector (J. P. Gordon and H. Kogelnik, "PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers," PNAS, Vol. 97, No. 9, pp. 4541-4550, 2000). The PMD vector  $\vec{P}$  can be separated into its two components  $\tau$  (DGD) and  $\vec{p}$  (PSP) as follows.

$$\vec{P}(\omega) = \tau(\omega) \cdot \vec{p}(\omega) \quad (1)$$

While the DGD is also referred to as 1st-order PMD,

10 2nd-order PMD parameters are calculated by deriving  $\vec{P}$  with respect to the frequency  $\omega$  as follows.

$$\frac{d\vec{P}(\omega)}{d\omega} = \frac{d\tau(\omega)}{d\omega} \cdot \vec{p}(\omega) + \tau(\omega) \cdot \frac{d\vec{p}(\omega)}{d\omega} \quad (2)$$

The 2nd-order PMD is composed of a polarization dependent chromatic dispersion  $\frac{d\tau(\omega)}{d\omega}$  [ps/nm] (DGD

15 slope) component and the rotation rate of the PSP  $\frac{d\vec{p}(\omega)}{d\omega}$

(rad/nm). Rotation rate of the PSP is measured in units of radians per nanometer. It leads to the effect that every spectral component of a modulated signal has its own associated PSP. Dependent on the state of input polarization of the modulated signal, the power of every spectral component is split into its associated two PSP (ratio of power splitting depends on angle between the

20

state of input polarization of the signal and the PSP of the fiber at the respective wavelength), whereby the two polarization components experience a DGD.

Further derivation leads to 3rd-order PMD parameters as follows.

$$\frac{d^2 \vec{P}(\omega)}{d\omega^2} = \frac{d^2 \tau(\omega)}{d\omega^2} \cdot \vec{P}(\omega) + \tau(\omega) \cdot \frac{d^2 \vec{P}(\omega)}{d\omega^2} + 2 \cdot \frac{d\tau(\omega)}{d\omega} \cdot \frac{d\vec{P}(\omega)}{d\omega} \quad (3)$$

$\frac{d^2 \tau(\omega)}{d\omega^2}$  and  $\frac{d^2 \vec{P}(\omega)}{d\omega^2}$  represent the chromatic dispersion slope and the change rate of PSP rotation, respectively. In the case the vectorial sum of the transmission span's PMD vector and the PMD vector of a PMD compensator is zero at least within the spectral bandwidth of the modulated signal, signal distortion due to PMD is perfectly mitigated.

Because perfect mitigation requires a huge number of DGD sections interleaved by polarization converters (Y. Li, A. Eyal, and A. Yariv, "Higher order error of discrete fiber model and asymptotic bound on multistaged PMD compensation," Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, No. 9, pp. 1205-1213, 2000), control speed is limited and total size and number of required components makes this type of perfect or nearly perfect compensation scheme unattractive at least from an economical point of view.

Fewer stages will ever leave a residual distortion due to higher-order PMD which they are not designed to compensate for (P. Ciprut et al., "Second-order polarization mode dispersion: Impact on analog and digital transmissions," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 16, No. 5, pp. 757-771, 1998; C. Francia, F. Bruyère, D. Penninckx, and M. Chbat, "PMD second-order effects on pulse propagation in single-mode optical fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, No. 12, pp. 1739-1741, 1998). But for a given transmission span with a specific and not-too-high PMD value, those schemes are able to partly match the PMD vector reversely. This leads to some residual but reduced penalty which has to be taken into account for system design considerations.

Fig. 12 gives a clear image for covered ranges of occurring 1st- (DGD) and 2nd-order (PSP rotation rate) PMD parameters in real fibers. For single mode fibers (SMFs) with PMD values of 4, 8 and 16 ps,  $5 \times 10^3$  realizations of a realistic fiber model with 1000 linear birefringent segments has been investigated (W. Weiershausen, R. Leppla, F. Küppers, and H. Schöll, "Polarization-mode dispersion in fibre transmission: Theoretical approach, impact on systems, and suppression of signal-degradation effects," *ECOC'99*, pp. II 130-II 133, 1999). Fig. 12

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

13

shows the PSP rotation rate versus the instantaneous DGD. While the instantaneous DGD follows the well known Maxwellian probability distribution function (not shown here), the maximum occurring PSP rotation rate decreases with increasing DGD.

#### Disclosure of Invention

It is an object of the present invention to provide a PMDC which compensates for the 1st- and higher-order PMD of an optical transmission line with reduced complexity.

The PMDC according to the first aspect of the present invention comprises a principal-state-of-polarization (PSP) adjuster and a mode-coupling adjuster. The PSP adjuster aligns a PSP of a concatenation of the optical transmission line and the PMDC, to an input state of polarization (SOP) of an optical signal input to the optical transmission line. The mode-coupling adjuster adjusts mode-coupling in the PMDC.

The PSP adjuster corresponds to e.g. a polarization converter and converts any input SOP to an arbitrary output SOP. The mode-coupling adjuster can adjust both DGD and PSP rotation rate of the PMDC by changing mode-coupling. Since the PSP adjuster is separated from

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

14

the mode-coupling adjuster and independently controllable, the 1st- and higher-order PMD is compensated for. Although the mode-coupling adjuster cannot convert any input SOP to an arbitrary output SOP, it is realized by a simpler device than a polarization converter.

Thus, the PMDC according to the first aspect compensates for not only the 1st-order PMD but also higher-order PMD with reduced complexity.

10 The PMDC according to the second aspect of the present invention comprises a PSP adjuster, a first birefringent element following the PSP adjuster, a mode-coupling adjuster following the first birefringent element and a second birefringent element following the  
15 mode-coupling adjuster. The PSP adjuster aligns a PSP of a concatenation of the optical transmission line and the PMDC, to an input SOP of an optical signal input to the optical transmission line. The mode-coupling adjuster adjusts mode-coupling in the PMDC.

20 The PSP adjuster corresponds to e.g. a polarization converter and each of the first and second birefringent elements correspond to a birefringent device such as a PMF, which introduces PMD. The mode-coupling adjuster can adjust both DGD and PSP rotation rate of the PMDC  
25 by changing mode-coupling of the first and second



birefringent elements. The mode-coupling adjuster is realized by a simpler device than a polarization converter as in the first aspect of the present invention.

Thus, the PMDC according to the second aspect compensates for not only the 1st-order PMD but also higher-order PMD with reduced complexity.

#### Brief Description of Drawings

Fig. 1 shows the first 1st-order PMD compensation scheme.

Fig. 2 shows the second 1st-order PMD compensation scheme.

Fig. 3 shows the third 1st-order PMD compensation scheme.

Fig. 4 shows a function of DGD of a fiber with PMD = 5 ps over wavelength.

Fig. 5 shows a function of DGD of a fiber with PMD = 10 ps over wavelength.

Fig. 6 shows a function of DGD of a fiber with PMD = 20 ps over wavelength.

Fig. 7 shows variation of PSP of a fiber with PMD = 5 ps over wavelength.

Fig. 8 shows variation of PSP of a fiber with PMD = 10 ps over wavelength.

Fig. 9 shows variation of PSP of a fiber with PMD

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

16

= 20 ps over wavelength.

Fig. 10 shows the first multi-stage PMD compensation scheme.

Fig. 11 shows the second multi-stage PMD compensation scheme.

Fig. 12 shows a PSP rotation rate versus an instantaneous DGD.

Fig. 13 shows a two-stage PMD compensation scheme.

Fig. 14 shows a rotation of eigenaxes of PMFs with the relative angle between them unchanged.

Fig. 15 shows relation between adjusted DGD and PSP rotation rate.

Fig. 16 shows dependence of DGDs on the angle between eigenaxes of PMFs.

Fig. 17 shows dependence of PSP rotation rates on the angle between eigenaxes of PMFs.

Fig. 18 shows the first two-stage PMDC.

Fig. 19 shows the second two-stage PMDC.

Fig. 20 shows the third two-stage PMDC.

20

#### Best Mode for Carrying Out the Invention

Hereinafter, preferred embodiments according to the present invention will be described in detail by referring to the drawings.

25 A PMD compensation scheme, which is in principle

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

17

able to adjust its characteristic such that it reversely matches the DGD and the PSP rotation rate of the transmission span at the center wavelength of the modulated signal, consists of e.g. two stages of polarization converter and PMF as shown in Fig. 13.

The system shown in Fig. 13 includes the transmitter 11, the transmission span 13, the receiver 14, the 1st-stage polarization converter 61, the 1st-stage PMF 62, the 2nd-stage polarization converter 63, the 2nd-stage PMF 64, and a distortion analyzer 65. The distortion analyzer 65 analyzes distortion of an optical signal after the 2nd-stage PMF 64 and outputs a feedback signal to the polarization converters 61 and 63. In this case, the polarization converters 61 and 63 and the PMFs 62 and 64 form a PMDC, and the polarization converters 61 and 63 can be realized by e.g. the following means.

- multiple rotating wave-plates
- multiple fiber squeezers
- rotatable fiber coils
- integrated optic realization (e.g. on LiNbO<sub>3</sub> substrate)
- Soleil-Babinet compensator (crystal or fiber optical)
- multiple tunable birefringent plates (e.g. LiNbO<sub>3</sub>, special ceramics)
- multiple sections of liquid-crystals
- temperature tuned PMF sections

- multiple fiber sections making use of the Faraday effect  
or a combination of the above principle schemes

In this two-stage compensation scheme, while the  
polarization converter 63 between the PMFs 62 and 64  
operates as a mode-coupling adjuster and adjusts the  
DGD and the PSP rotation rate of the PMFs, the polarization  
converter 61 before the PMF 62 operates as a PSP adjuster  
and adjusts the PSP of the PMDC against the PSP of the  
transmission span 13. It further controls the direction  
in which the principal states of the PMDC rotate. Because  
this scheme not only compensates for DGD at the center  
wavelength but also adjusts PSP rotation rate, its  
performance is in principle higher than that of a  
one-stage compensation scheme.

Taking a closer look at a two-stage compensation  
scheme, whereby each stage consists of a polarization  
converter and a PMF it can be shown that the complexity  
can be reduced without limiting the performance or  
adjustment range.

It is well known that the DGD (1st-order PMD) of  
the concatenation of two PMFs only depends on the relative  
angle  $\phi$  between the eigenstates of the PMFs. The DGD  
is adjustable by means of e.g. mechanical rotation by  
the angle  $\phi$  and obeys the following equation.

$$DGD = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2 \cos(2\phi)} \quad (4)$$

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

19

whereby  $\tau_1$  and  $\tau_2$  are the DGD values of the first and second PMFs, respectively.

The main outcome of the present invention is that not only the DGD but also the PSP rotation rate (part of 2nd-order PMD) only depends on the relative angle  $\phi$  between the eigenstates of the PMFs. Rotating the eigenaxes of the PMFs while the relative angle  $\phi$  between them is held constant does not change the DGD or PSP rotation rate. This behaviour is illustrated with the two Poincaré spheres in Fig. 14.

In Fig. 14, black points represent eigenstates of a concatenation of the second polarization converter and the second PMF with the relative angle  $\phi$  of the values  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 80^\circ$  and the black point 71 corresponds to the eigenstate of the first PMF. White points represent principal states of a concatenation of the first PMF, the second polarization converter and the second PMF with the same values of  $\phi$  in a range of wavelength between 1549.95 nm and 1550.05 nm. With an increasing angle  $\phi$  ( $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ ) the DGD decreases (from  $\tau_1 + \tau_2$  to  $|\tau_1 - \tau_2|$ ) and the PSP rotation rate increases. From the left-side sphere 72 to the right-side sphere 73, the absolute angle of the eigenaxis is changed while the relative angle  $\phi$  between the eigenaxes is held constant. With this type of change the functions of the DGD and

PSP rotation rate do not change.

Depicted in Fig. 15 is the relation between adjusted DGD and PSP rotation rate to further clarify the adjustment range of a two-stage compensation scheme.

5 Exemplified shown is the DGD and PSP rotation rate dependence for two-stage compensators with a DGD of the sections (stages) of 10, 20 and 40 ps. The DGD per section is nearly equal to the DGD of the PMF because the DGD of the polarization converter is, if properly constructed, negligible. The same graphs are obtained independent  
10 on whether a fully functional polarization converter is placed between the PMF sections or the PMFs are rotated against each other.

Shown in Figs. 16 and 17 is the dependence of the  
15 DGD and the PSP rotation rate, respectively, on the angle between the eigenaxes of the PMFs. The dependence is exemplified for a two-stage compensation scheme with a DGD of the sections of 10, 20 and 40 ps.

If, for example, the polarization converter is made  
20 by using variable birefringent ( $0-2\pi$  retardance range) plates, at least three plates are required to allow the conversion of any input SOP to an arbitrary output SOP and one control signal is required to control each plate. This means that a two-stage PMDC requires at least 6  
25 feedback signals from the distortion analyzer. Replacing

the second polarization converter between the PMFs by a mode-coupling adjuster such as a phase shifter, which can be realized by using e.g. one variable birefringent plate, the number of necessary control signals for the plates is reduced from 6 to 4. Because a polarization converter rotates the polarization in a spherical coordinate system, the degrees of freedom are reduced from 4 to 3 for the two-stage PMDC with reduced complexity.

For realization of the above described two stage PMD compensation scheme with reduced complexity the following realizations are possible.

1. Mechanical rotation of the PMF

Fig. 18 shows a system including this type of two-stage PMDC. This system has a configuration similar to that shown in Fig. 13, except that the second polarization converter 63 is replaced with a mechanical rotator 71 which operates as a mode-coupling adjuster.

2. Insertion of a rotatable waveplate (retardation plate) between the PMFs

Fig. 19 shows a system including this type of two-stage PMDC. This system has a configuration similar to that shown in Fig. 13, except that the second polarization converter 63 is replaced with a rotatable waveplate 81. The rotatable waveplate 81 is a fixed phase shifter with adjustable eigenstates and operates as a

mode-coupling adjuster.

3. Insertion of a variable birefringent plate between the PMFs

Fig. 20 shows a system including this type of two-stage PMDC. This system has a configuration similar to that shown in Fig. 13, except that the second polarization converter 63 is replaced with a variable birefringent plate 91. The variable birefringent plate 91 is an adjustable phase shifter and operates as a mode-coupling adjuster.

For the systems shown in Figs. 19 and 20, the polarization maintaining is best to be aligned angular such that there eigenaxes match. In the system shown in Fig. 19, the retardation of the rotatable waveplate is best to be  $\lambda/2$ . This would assure the same adjustment range as realizable by means of mechanical rotation as shown in Fig. 18. While a lower retardation reduces adjustment range, a higher retardation does not reduce adjustment range but leads to stronger dependence of DGD and PSP rotation rate on rotation angle. In the system shown in Fig. 20, the variable birefringent plate 91 is best to be aligned with its eigenaxis by an angle of  $45^\circ$  with respect to the eigenaxis of the PMFs. In order to realize the same adjustment range as by means of mechanical rotation, the birefringence should be



variable between 0 and  $2\pi$ .

All three realization possibilities have the advantage of reduced complexity compared to compensation schemes making use of cascaded polarization converter and PMF without limiting the operating range. This in principle allows to make the necessary control logic simpler and to enhance the speed at which the control algorithm can adaptively change the characteristic of the compensator to match the PMD characteristic of the transmission span.

Although the PMF of the two sections introduces a DGD to a light beam propagating within it, an arbitrary birefringent element (or a DGD device) can also be used to introduce a DGD. This can be realized by the following means.

1. birefringent crystals (e.g. Titaniumdioxide ( $\text{TiO}_2$ ), Yttriumorthovanadate ( $\text{YVO}_4$ ), natural Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ))
2. an integrated optic device where the birefringence of the substrate ( $\text{LiNbO}_3$ ) is used to realize the DGD
3. a combination of a PBS, different path lengths and a PBC

Furthermore, in order to adapt the adjustment range of the proposed two-stage compensation scheme to the PMD value of the transmission span, not necessarily equal DGDs for the two sections can be selected.

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

24

From a physical point of view possible control algorithms (operation methods) for the two-stage PMDC are described as follows.

5 1st operation method:

- a) adjust DGD of the PMDC with the mode-coupling adjuster such that the DGD is maximum (PSP rotation rate  $\approx 0^\circ/\text{GHz}$ )
- b) align a PSP of the whole system (the concatenation of the transmission span and the PMDC) to the input SOP of an optical signal, which is input to the transmission span by the transmitter, with the first polarization converter  $\rightarrow$  1st-order simple compensation
- c) reduce the DGD of the PMDC with the mode-coupling adjuster while still aligning the PSP of the whole system to the input SOP until the PSP rotation rate of the whole system is minimized  $\rightarrow$  2nd-order PSP rotation rate compensation
- d) work by the 2nd operation method described below until the DGD of the PMDC becomes lower than the DGD of the transmission span

2nd operation method:

- a) adjust the DGD of the PMDC with the mode-coupling adjuster such that the DGD equals the DGD of the transmission span

b) rotate PSP of the PMDC with the first polarization converter until it is aligned to the output PSP of the transmission span

5 By performing the operations a)-c) of the 1st operation method, the PSP of the whole system is aligned to the input SOP at spectral components in a broader wavelength range, i.e., not only at the center wavelength but also at the other spectral components in the range.

10 Due to the statistical nature of PMD, however, it can happen that the DGD of the transmission span becomes higher than the highest adjustable DGD of the PMDC. In this case, the 1st operation method is no longer applicable and the PMDC performs operation according to the 2nd operation method. There is some gray region if the DGD of the transmission is just slightly higher than the highest adjustable DGD.

In this region, the 1st operation method may lead to a better signal improvement than the 2nd operation method. The greater the difference between the transmission span's and PMDC's maximum DGDs, the more unlikely it is that the 1st operation method succeeds. It is also pointed out that the 1st operation method may perform better even if the transmission span's DGD is lower than the PMDC's maximum DGD. Both methods can

25

be used alternatively in this region and which one performs better can not be decided in general.

While the description of the embodiments focuses on a PMD compensation scheme, a PMD compensating system  
5 further requires a feedback signal carrying information on signal distortion to allow a control logic to adaptively adjust variable parameters of the compensation scheme. In order to realize a PMDC with the proposed two-stage scheme, any of already proposed  
10 schemes is applicable. This includes but is not limited to spectral-hole burning (C. Glingener, A. Schöpflin, A. Färbert, G. Fischer, R. Noé, D. Sandel, S. Hinz, M. Yoshida-Dierolf, V. Mirvoda, G. Feise, H. Herrmann, R. Ricken, W. Sohler, and F. Wehrmann, "Polarization mode  
15 dispersion compensation at 20 Gb/s with a compact distributed equalizer in LiNbO<sub>3</sub>," OFC'99, paper PD29, 1999; G. Ishikawa and H. Ooi, "Polarization-mode dispersion sensitivity and monitoring in 40-Gbit/s OTDM and 10-Gbit/s NRZ transmission experiments," OFC'98,  
20 paper WC5, pp. 117-119, 1998), degree of polarization (N. Kikuchi and S. Sasaki, "Polarization-mode dispersion (PMD) detection sensitivity of degree of polarization method for PMD compensation," ECOC'99, pp. II 8-II 9, 1999; H. Rosenfeldt, R. Ulrich, U. Feiste, R. Ludwig,  
25 H. G. Weber, and A. Ehrhardt, "PMD compensation in 10

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

27

Gbit/s NRZ field experiment using polarimetric error signal," Electronics Letters, Vol. 36, No. 5, pp. 448-450, 2000) or eye-opening measurement.

In such a real PMDC, the distortion analyzer  
5 provides the control logic with a measure which has to be maximized. Therefore, just the feedback signal from the distortion analyzer is maximized by varying adjustable parameters of the PMDC. Thus, the control logic automatically finds the best operation method from  
10 a physical point of view.

According to the present invention, not only the 1st-order PMD but also higher-order PMD is compensated for by a multi-stage compensation scheme, thereby not only PMD at the center wavelength in a wavelength range  
15 but also that at the other spectral components is compensated for. Thus, the performance of a PMDC is higher than that of a conventional one-stage PMDC.

Further, using a mode-coupling adjuster instead of a fully functional polarization converter, the  
20 complexity of the PMDC can be reduced without limiting the performance or adjustment range.

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

28

## CLAIMS

1. A polarization mode dispersion compensator for an optical transmission line, comprising:
  - 5 a principal-state-of-polarization adjuster aligning a principal state of polarization of a concatenation of the optical transmission line and the polarization mode dispersion compensator, to an input state of polarization of an optical signal input to the
  - 10 optical transmission line; and
  - a mode-coupling adjuster adjusting mode-coupling in the polarization mode dispersion compensator.
2. A polarization mode dispersion compensator for an optical transmission line, comprising:
  - 15 a principal-state-of-polarization adjuster aligning a principal state of polarization of a concatenation of the optical transmission line and the polarization mode dispersion compensator, to an input
  - 20 state of polarization of an optical signal input to the optical transmission line;
  - a first birefringent element following said principal-state-of-polarization adjuster;
  - a mode-coupling adjuster following said first
  - 25 birefringent element and adjusting mode-coupling in the

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

29

polarization mode dispersion compensator; and  
a second birefringent element following said  
mode-coupling adjuster.

5 3. The polarization mode dispersion compensator  
according to claim 2, wherein  
said principal-state-of-polarization adjuster  
aligns the principal state of polarization of the  
concatenation of the transmission line and the  
10 compensator to the input state of polarization of the  
optical signal at a plurality of spectral components  
in a wavelength range.

4. The polarization mode dispersion compensator  
15 according to claim 2, wherein  
said mode-coupling adjuster adjusts a  
differential group delay of said first and second  
birefringent elements and a rotation rate of a principal  
state of polarization of said first and second  
20 birefringent elements.

5. The polarization mode dispersion compensator  
according to claim 2, wherein  
said mode-coupling adjuster corresponds to one of  
25 a mechanical rotator, a rotatable retardation plate and

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

30

a variable birefringent plate.

6. The polarization mode dispersion compensator according to claim 2, wherein

5        said mode-coupling adjuster corresponds to a fixed angle between eigenaxes of said first and second birefringent elements, the angle and differential group delay values of said first and second birefringent elements being chosen such that a realized rotation rate  
10 of a principal state of polarization of the compensator does only introduce an acceptable amount of signal distortion for a case where a rotation rate of a principal state of polarization of the optical transmission line becomes zero due to environmental fluctuations.

15

7. A method of compensating for polarization mode dispersion on an optical transmission line using a polarization mode dispersion compensator, comprising:

      adjusting a differential group delay of the  
20 polarization mode dispersion compensator such that the differential group delay is maximum;

      aligning a principal state of polarization of a concatenation of the optical transmission line and the polarization mode dispersion compensator, to an input  
25 state of polarization of an optical signal input to the



WO 03/021821

PCT/JP01/07567

31

optical transmission line; and

reducing the differential group delay of the  
polarization mode dispersion compensator while still  
aligning the principal state of polarization of the  
concatenation of the transmission line and the  
5 compensator to the input state of polarization, until  
a rotation rate of a principal state of polarization  
of the concatenation of the transmission line and the  
compensator is minimized.

10

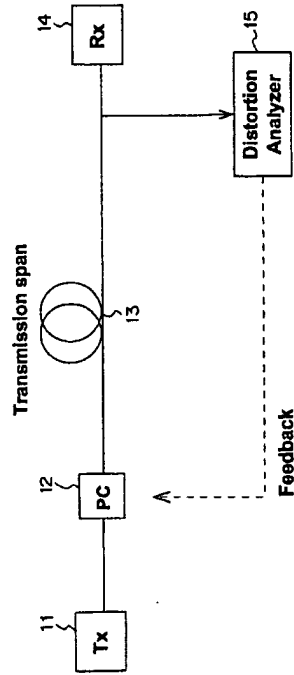


FIG. 1

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

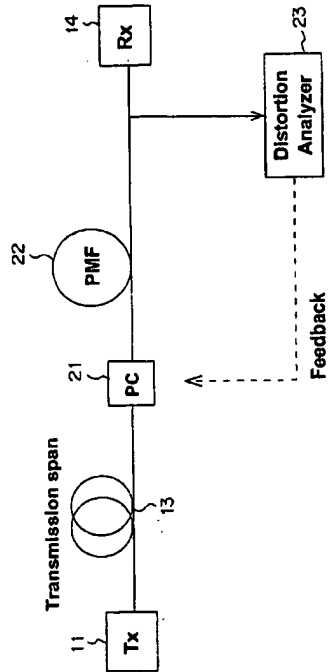
2  
20

FIG. 2

WO 03/021821

PCT/JPO1/07567

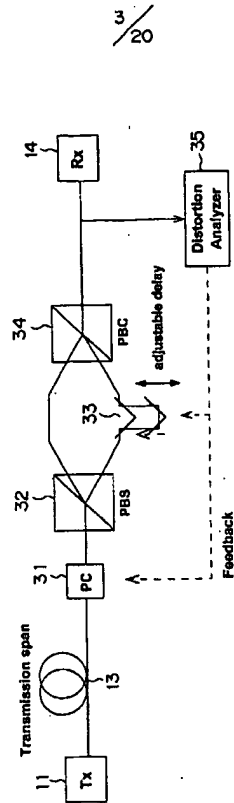


FIG. 3

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

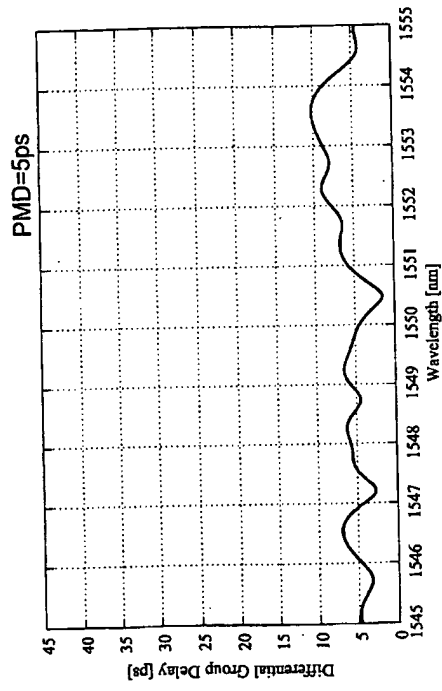
 $\frac{4}{20}$ 

FIG. 4

WO 03/021821

PCT/JPO1/07567

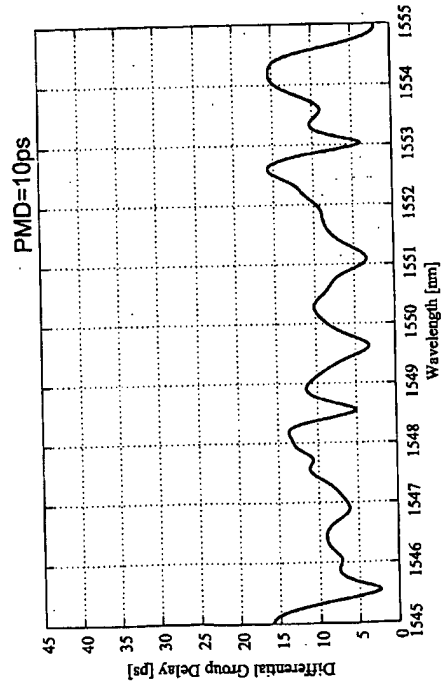
 $\frac{5}{20}$ 

FIG. 5

WO 03/021821

PCT/JPO1/07567

6 / 20

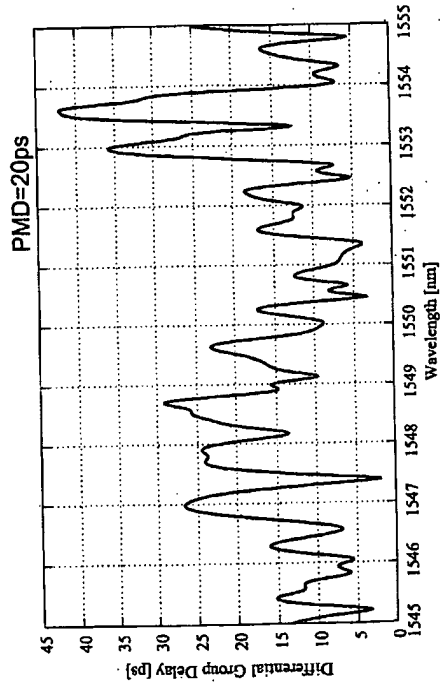


FIG. 6

WO 03/021821

PCT/JPO1/07567

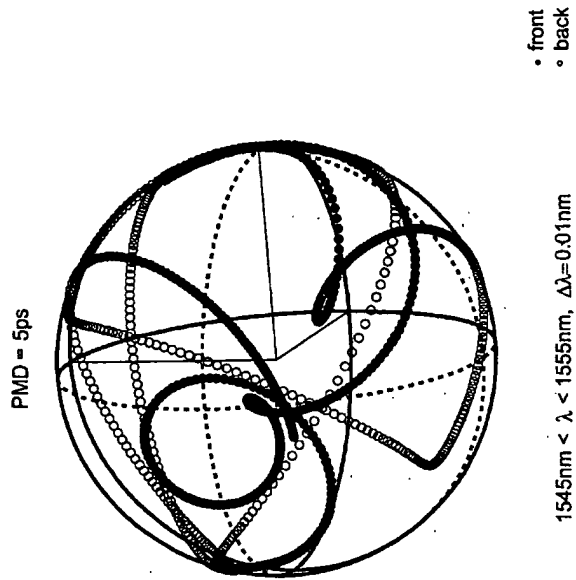
 $\frac{7}{20}$ 

FIG. 7



WO 03/021821

PCT/JP01/07567

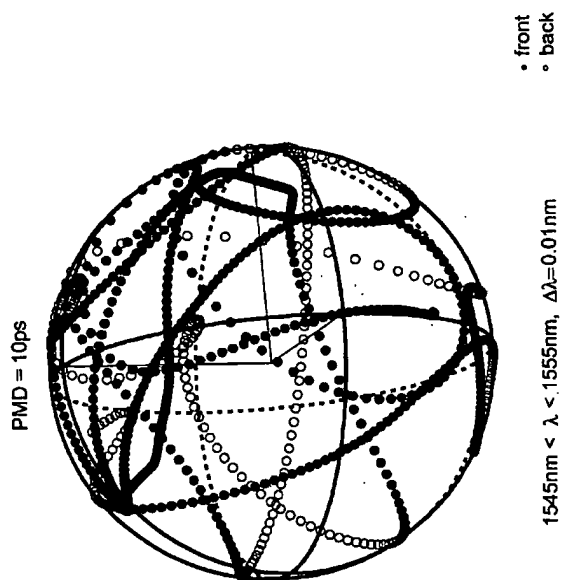
 $\frac{8}{20}$ 

FIG. 8

WO 03/021821

PCT/JPO1/07567

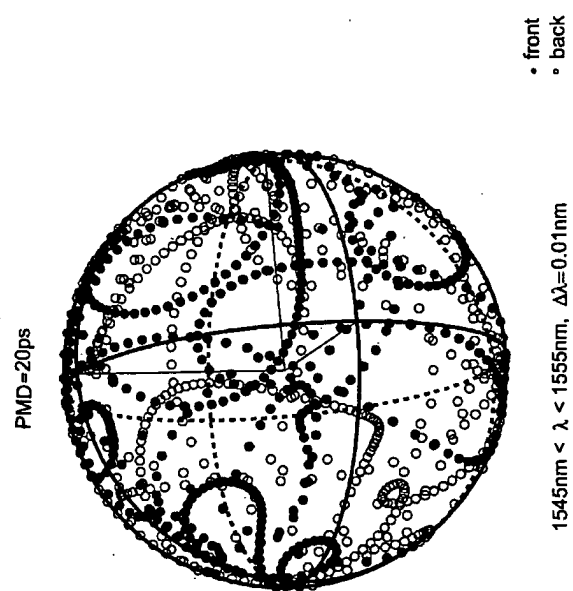
 $\frac{9}{20}$ 

FIG. 9

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

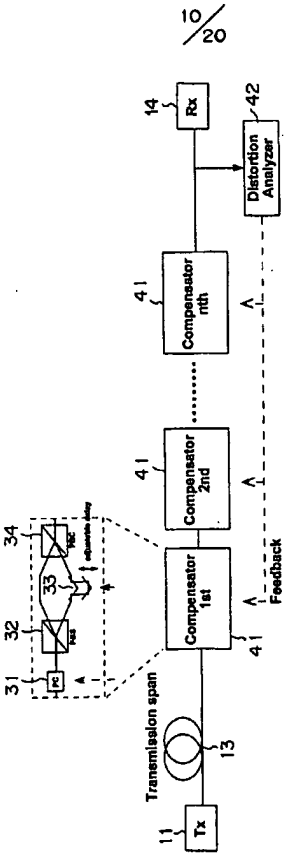


FIG. 10

WO 03/021821

PCT/JPO1/07567

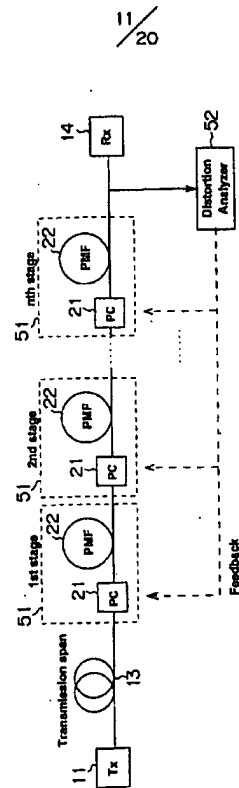


FIG. 11

WO 03/021821

PCT/JPO1/07567

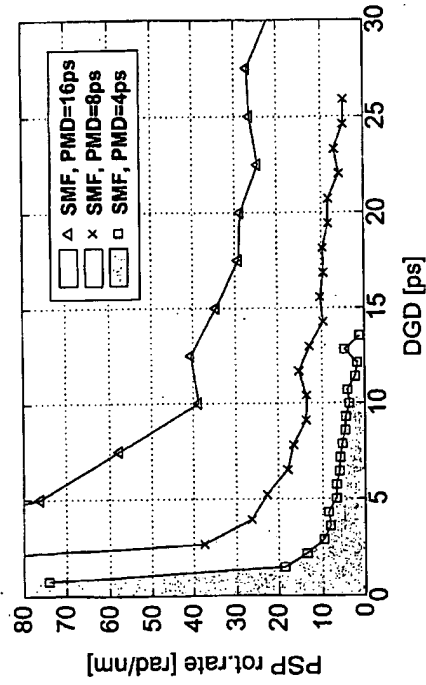
12/  
20

FIG. 12.

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

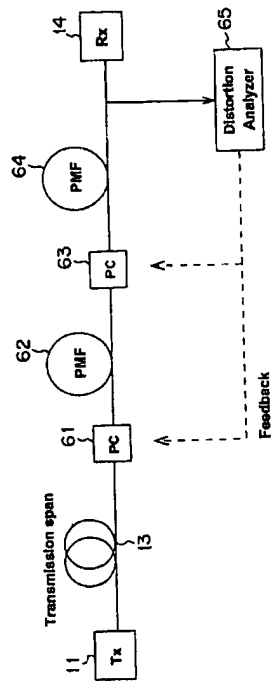
13/  
20

FIG. 13

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

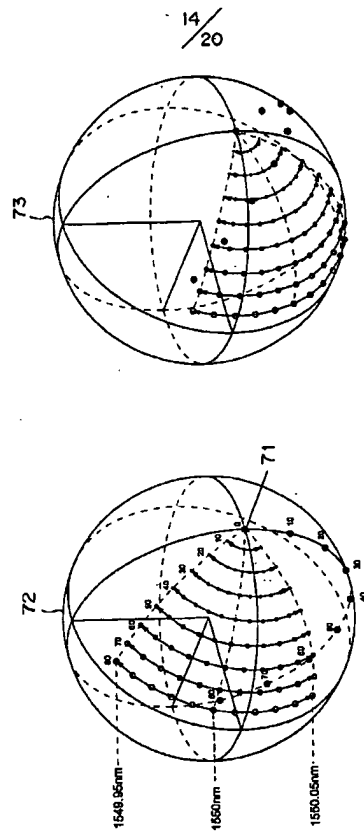


FIG. 14

WO 03/021871

PCT/JP01/07567

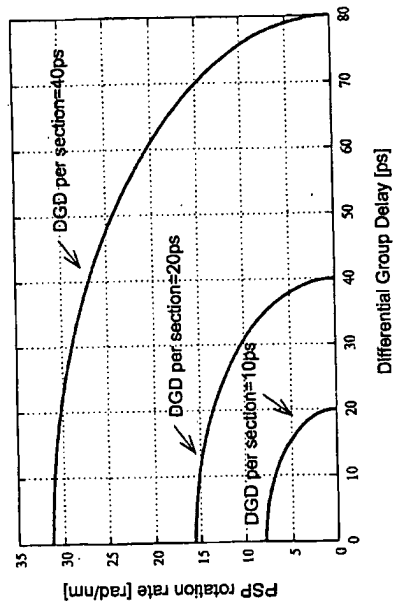
15  
20

FIG. 15



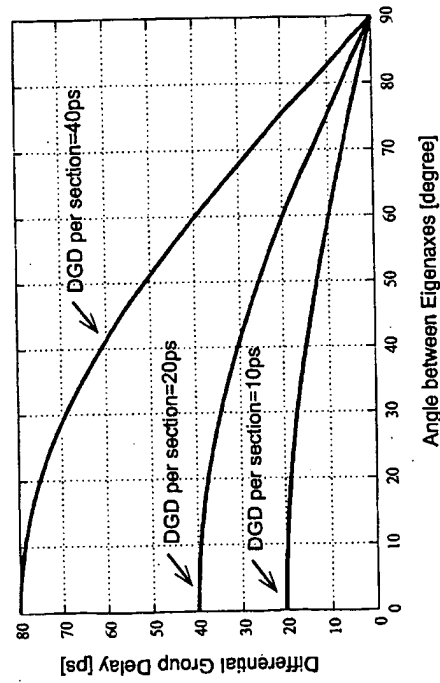
16/  
20

FIG. 16

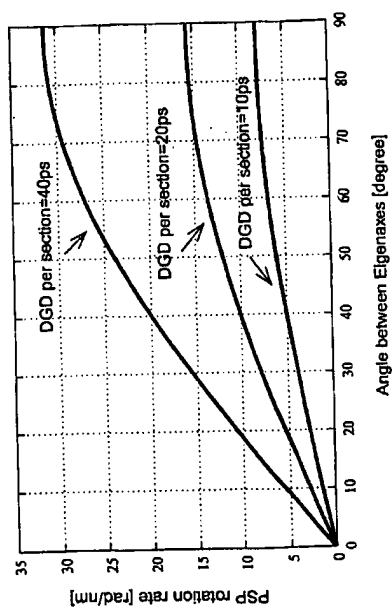
17  
20

FIG. 17

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

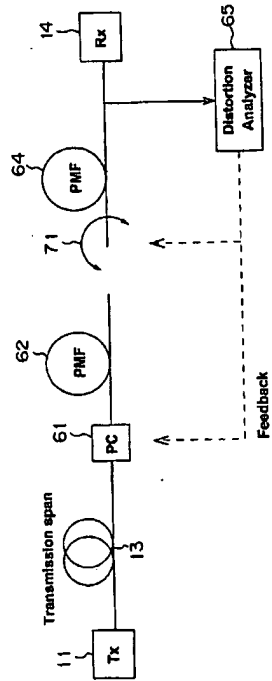
18/  
20

FIG. 18

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

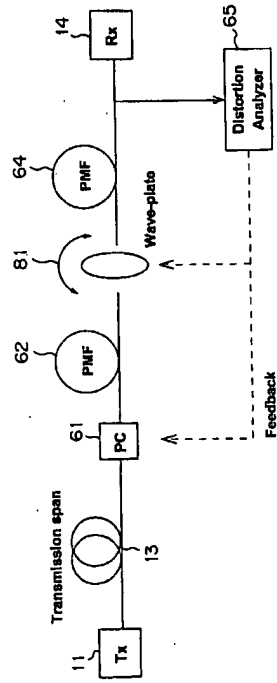
19/  
20

FIG. 19

WO 03/021821

PCT/JP01/07567

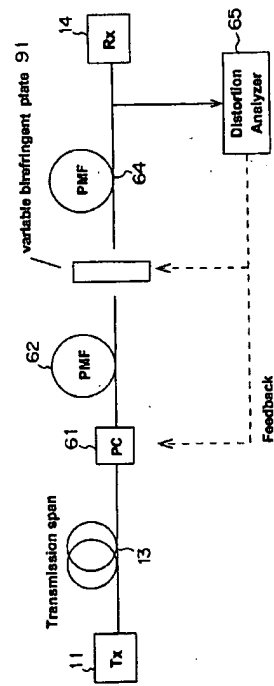
~~20~~  
20

FIG. 20

## 【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/JP 01/07567
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 H04B10/18 G02B6/34		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Univision documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 H04B G02B		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal, INSPEC, PAJ, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	PATSCHER J ET AL: "COMPONENT FOR SECOND-ORDER COMPENSATION OF POLARISATION-MODE DISPERSION" ELECTRONICS LETTERS, IEE STEVENAGE, GB, vol. 33, no. 13, 19 June 1997 (1997-06-19), pages 1157-1159, XP000734134 ISSN: 0013-5194	1-4,7
Y	the whole document	5
A	figure 2	6
— — — — —		
-/-		
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.		
* Special categories of cited documents : "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubt on priority claims or which is cited to establish the publication date of another claim or other special reason (as specified) "O" document relating to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the practice or theory underlying the invention "X" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, each contribution being obvious to a person skilled in the art "A" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 25 April 2002		Date of mailing of the international search report 14/05/2002
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.O. Box 6610 Patentplan 2 NL - 2201 TV Rijswijk Tel (+31-70) 340-3040, Tx 31 651 apo nl Fax (+31-70) 340-3010		Authorized officer Revillie, L

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2002)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/JP 01/07567
C:(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	SANDEL D ET AL: "AUTOMATIC POLARISATION MODE DISPERSION COMPENSATION IN 40GBIT/S OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM" ELECTRONICS LETTERS, IEE STEVENAGE, GB, vol. 34, no. 23, 12 November 1998 (1998-11-12), pages 2258-2259, XP000871255 ISSN: 0013-5194	1,2
Y	page 1, right-hand column, line 12 - line 16 figure 2	5
X	Q. YU; L.S. YAN; Y. XIE; M. HAUSER; A.E. WILLNER: "Higher Order Polarization Mode Dispersion Compensation Using a Fixed Time Delay Followed by a Variable Time Delay" IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, vol. 13, no. 8, August 2001 (2001-08), pages 863-865, XP002197429	1,2,5-7
A	page 863, left-hand column, line 26 -right-hand column, line 3 page 863, right-hand column, line 28 - line 36 figures 1,3	3,4
E	US 2002/018267 A1 (TAO JUN ET AL) 14 February 2002 (2002-02-14) abstract page 3, left-hand column, paragraph 30 page 3, right-hand column, line 1 - line 5 page 7, line 5 - line 32 claims 1-6 figure 6	1,2,5,7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT			
Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)
US 2002018267 A1		14-02-2002	NONE

Information on patent family members

International Application No  
PCT/JP 01/07567

Publication date

Form PCT/ISA/19 (Indicate family members) (July 1992)



---

フロントページの続き

Fターム(参考) 5K102 AA01 AA15 KA05 KA33 MA03 MB12 MD01 MH03 MH14 MH21  
PH22 PH24 RB01